

MAREK PIEKARCZYK\*

ZASTOSOWANIE POŁĄCZEŃ KLEJONYCH  
W KONSTRUKCJACH METALOWYCHAPPLICATION OF GLUED CONNECTIONS IN METAL  
STRUCTURES

## Streszczenie

W artykule dokonano przeglądu współczesnych osiągnięć w zakresie wykorzystania techniki klejenia w konstrukcjach metalowych. Scharakteryzowano stosowane obecnie i dostępne na rynku kleje pod kątem ich własności mechanicznych. Podano zasady projektowania połączeń klejonych i podstawowe metody ich obliczania. Wskazano najważniejsze przykłady zastosowania takich połączeń w budownictwie metalowym.

*Słowa kluczowe: konstrukcje metalowe, klejenie, połączenia*

## Abstract

A review of contemporary achievements in the field of advantages taken from the glueing technique in metal structures is done in the paper. Adhesives being in use at present and accessible on the market are characterized taking into account their mechanical properties. Design rules of glued connections and basic methods for their calculations are given. The most significant examples of the applications of the joints in metal building industry are shown.

*Keywords: metal structures, glueing technique, connections*

\* Dr hab. inż. Marek Piekarczyk, prof. PK, Instytut Materiałów i Konstrukcji Budowlanych, Wydział Inżynierii Łądowej, Politechnika Krakowska.

## 1. Wstęp

W ostatnim czasie, po dłuższym okresie stagnacji, wzrasta zainteresowanie wykorzystaniem techniki klejenia w konstrukcjach metalowych w budownictwie. Wydaje się celowym przedstawienie współczesnych osiągnięć w tej dziedzinie, która rozwijana jest obecnie głównie w kilku ośrodkach naukowych w Niemczech: na Brandemburskim Uniwersytecie Technicznym w Cottbus [7, 54, 58, 61–63], Uniwersytetach Technicznych w Aachen i Kaiserslautern [7, 11], Braunschweigu [7, 8] a także w Holandii na Politechnice w Delft [8], w Polsce na Politechnice Warszawskiej [2, 45, 75, 76] i Krakowskiej [46–48] oraz w innych ośrodkach w Europie i Stanach Zjednoczonych [8, 44] przy wsparciu znanych firm przemysłu chemicznego, by wspomnieć niemieckie Kömmerling Chemische Fabrik GmbH, 3M Deutschland GmbH czy szwajcarską Sika Schweiz AG [7].

Klejenie uważane do niedawna za awangardową metodę zespolenia materiałów zyskuje na popularności dzięki między innymi takim spektakularnym sukcesom, jakim było podniesienie półciężarówki o masie ponad 5 ton zamocowanej do dźwigu przy pomocy dostępnego w handlu kleju Loctite Superglue firmy Henkel uznanego z tej racji za najmocniejszy klej na świecie [38].

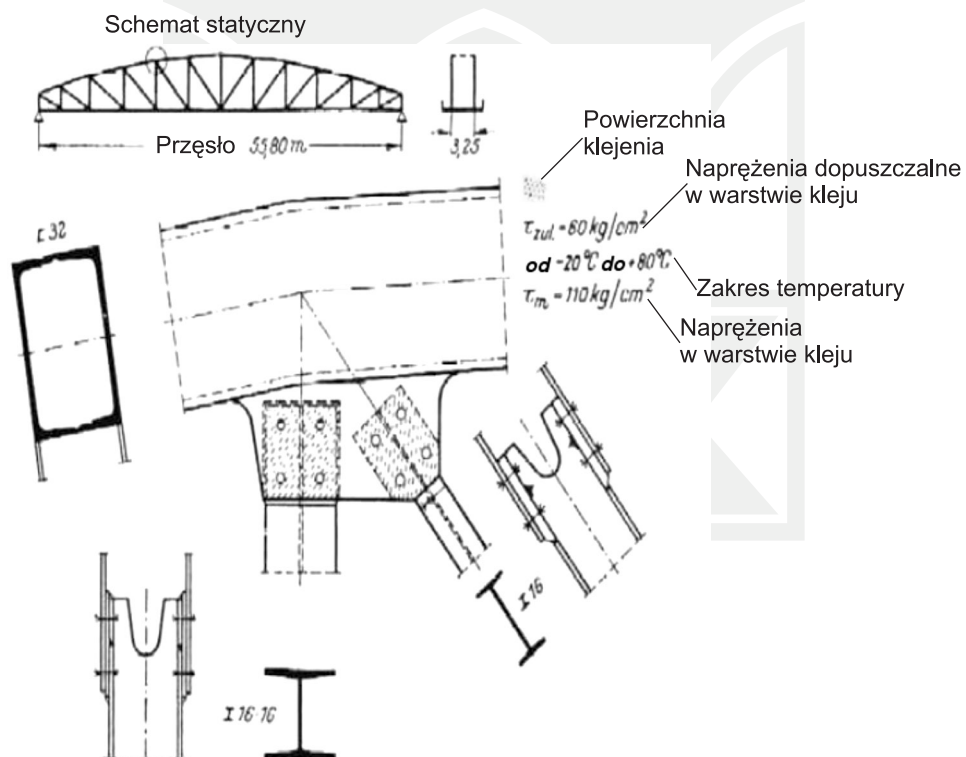
## 2. Rys historyczny

Pomysł zastosowania klejenia do połączeń części metalowych miał swoje początki w odpowiedniej adaptacji klejów fenolowych stosowanych początkowo do spajania drewna, a także w wyniku użycia w metalowych urządzeniach mechanicznych gumowych części wulkanizowanych. W roku 1942 zastosowano po raz pierwszy w przemyśle lotniczym (do łączenia części metalowych) modyfikowany klej fenoloformaldehidydu Redux 775 z ulepszczeniem w postaci termoplastycznego proszku z metylalu poliwinylowego, który podnosi wytrzymałość kleju i jego odporność na wpływy środowiska. Klej ten stosowany jest w konstrukcji samolotów (Fokker 100) do dzisiaj [8].

Przełomem w klejeniu części metalowych stało się wszakże wprowadzenie na rynek przez szwajcarską firmę CIBA żywic epoksydowych w roku 1946, które znalazły główne zastosowanie także w przemyśle lotniczym, w szczególności po rozpowszechnieniu się techniki trawienia powierzchni łączonych przy użyciu kwasu chromowego.

Przykładem udanego zastosowania klejenia w budownictwie są, powstały w roku 1950 pierwszy „klejony” (połączenia klejone asekurowane są przez śruby na wypadek awarii kleju) most stalowy nad kanałem Lippe – Seiten koło Marl w Niemczech, użytkowany do 2001 roku bez uszkodzeń (rys. 1) i klejony most tego typu powstały także nad tym kanałem w roku 1963 [54].

Z uwagi na ogromny rozwój spawania od końca lat 1960-tych technika klejenia w budownictwie zeszała na plan dalszy i dopiero dzisiaj zyskuje na znaczeniu, w szczególności jako metoda wzmacniania istniejących konstrukcji cienkościennych [46, 48, 59, 60, 62, 63], a także jako alternatywna metoda ich zespolenia, np. [7, 11, 45, 54, 63]. Kleje stosowane są także z powodzeniem do łączenia części metalowych ze szklanymi we współczesnych obiektach architektonicznych, głównie elementów ich fasad [2, 34, 52, 61].



Rys. 1. Most w Marl-Hüls nad kanałem Lippe – Seiten (1956) ze szczegółami konstrukcyjnymi [46, 54]

Fig. 1. Bridge in Marl-Hüls over the channel Lippe – Seiten (1956) with structural details [46, 54]

W tym miejscu należy wspomnieć wkład polskiej myśli naukowo-technicznej w rozwój techniki klejenia w zakresie konstrukcji metalowych. Na uwagę zasługują pierwsze prace w tym zakresie F. Szelągowskiego [68] z wczesnych lat 60. XX wieku i próby stosowania łączenia konstrukcji stalowych z materiałami kompozytowymi, np. prace K. Rykaluka i A. Kowalskiego na Politechnice Wrocławskiej (za [51]), a dalej prace badawcze nad wytrzymałością sklein Z. Pancewicza i współpracowników z Politechniki Warszawskiej [3, 56, 57].

W roku 1963 zastosowano w Polsce klejenie w mostach do łączenia żelbetowych prefabrykatów z dźwigarami stalowymi żywicami epoksydowymi [42], a następnie do uzupełnienia zbrojenia w mostach betonowych przez zewnętrzne doklejenie płaskowników stalowych [43, 49, 67].

Techniki klejenia metali są od wielu lat przedmiotem zainteresowania Lotniczego Instytutu Techniki Lotniczej WAT, czego wyraz daje przegląd prac J. Godzimirskiego i współpracowników zestawiony tu od 1982 do 2006 [12–30]. Na szczególną uwagę zasługuje ponadto współczesna praca monograficzna M. Łagody [51], dotycząca wzmacniania mostów przez doklejenie elementów. Wykonywane w ramach tej pracy doświadczenia i wnioski z wieloletniej praktyki wykazały, że połączenia klejowo-sprężane są bardzo przydatne z ekonomicznego i technicznego punktu widzenia przy wzmacnianiu i budowie mostów stalowych. W ostatnich latach, jak to podniesiono we wstępie, prace w zakresie stosowania technik klejenia w szczególności do łączenia elementów fasad prowadzone były na Politechnice Warszawskiej pod kierunkiem W. Żółtowskiego [75–82], a także na Politechnice Krakowskiej w zakresie wzmacniania konstrukcji blachownicowych przez doklejenie elementów [46–48, 60].

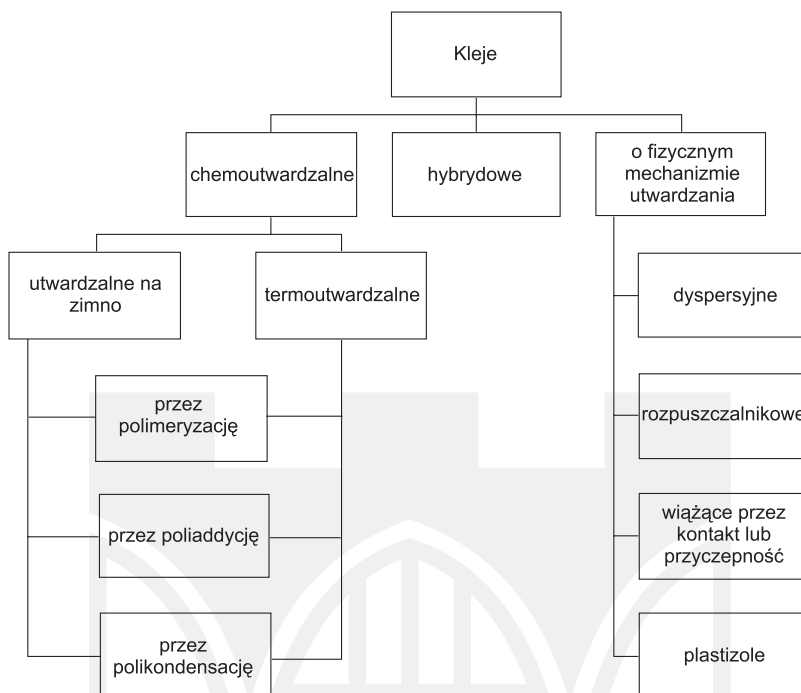
Na Politechnice Krakowskiej powstały także prace dotyczące techniki klejenia w zakresie budownictwa żelbetowego i murowego, które można tu odnotować z uwagi na ich uniwersalny charakter w odniesieniu do charakterystyk materiałowych klejów [74] i pracy skleiny [50].

### **3. Rodzaje klejów do konstrukcji metalowych i ich podstawowe właściwości**

#### **3.1. Klasyfikacja i typy klejów**

Klasyfikacji klejów można dokonać w oparciu o różne kryteria, np. wg charakteru chemicznego składnika podstawowego (nieorganiczne, organiczne naturalne i organiczne syntetyczne), wg konsystencji (ciekłe, plastyczne, stałe) czy wg sposobu utwardzania. Dalej przedstawiono przykładową klasyfikację wg sposobu utwardzania (rys. 2), najbardziej charakterystyczną dla klejów w konstrukcjach metalowych [11].

Poza wspomnianymi już w rozdziale 2 klejami fenolowymi modyfikowanymi metylalem lub butylnym poliwinylowym (np. Redux 775) oraz jednoskładnikowymi klejami silikonowymi utwardzonymi w temperaturze pokojowej, stosowanymi do przyłączania elementów szklanych, największe znaczenie w konstrukcjach metalowych zyskały utwardzane w drodze polimeryzacji kleje dwuskładnikowe na bazie poliestru, winylestru lub akrylu, w szczególności kleje epoksydowe i poliuretanowe, a także poliuretanowe kleje jednoskładnikowe. Przykładowe zestawienie klejów tego typu podaje tabela 1 sporządzona wg danych dostępnych w opracowaniach niemieckich [7, 54]. Kleje przedstawiono w taki sposób, aby ich układ korespondował z rys. 3 prezentującym zależność własności sprężystych klejów od ich składu chemicznego.



Rys. 2. Klasyfikacja klejów wg sposobu utwardzania

Fig. 2. Classification of adhesives by hardening system

Na rynku polskim także oferowana jest szeroka gama klejów konstrukcyjnych o wysokich parametrach wytrzymałościowych. Przykładowo w tabeli 2 podano zestawienie typów klejów do metali firmy Proxima NTR z Bełchatowa i ich podstawowe właściwości [66], zaś w tabeli 3 charakterystykę klejów oferowanych do wzmacniania konstrukcji przez firmę Megachemie (Kraków) [53].

Inni producenci obecni na polskim rynku to firmy: Emporia z Oleszna oferująca m. in. klej uniwersalny do zastosowań budowlanych Ecoll 8001 [71], firma Den Braven East Sp. z o.o. z siedzibą k. Poznania oferująca duży wybór klejów do metali typu: Montagefix i Epofix [73], dystrybutorzy klejów Loctite Henkel dostarczający m. in. kleje Loctite Mysol (epoksydowe) do stali w 21 odmianach, stali nierdzewnej w 15 odmianach, stali ocynkowanej w 13, aluminium 19 i miedzi w 15 odmianach [72], firma Loxit z Rumii oferująca kleje do zabezpieczania gwintów, osadzania części i łączenia elementów metalowych [39], dystrybutorzy specjalistycznych klejów przemysłowych Loxeal do wielorakich zastosowań [40]. Informacja internetowa w tym zakresie jest bardzo rozbudowana i przedstawiono tu tylko niektóre dane.

Kleje do metali wg [7, 54]. Właściwości

Rys.	Lp.	Nazwa	Producent	Typ	Moduł sprężystości podłużnej $E_s$ [MPa]	Wytrzymałość na rozciąganie $\sigma_a$ [MPa]	Odształcenie $\epsilon_s$ przy maksymalnych naprężeniach rozciągających [%]	Wytrzymałość na ścinanie $R_c$ [MPa]	Moduł sprężystości postaciowej $G_s$ [MPa]	Zastosowanie	Cechy charakterystyczne
I	1	Körarop 558	Kömmerring	2-składnikowa żywica epoksydowa	2100	20,0	2,1	22	550	Połączenia metal-metal, metal-szkło, metal-ceramika	Wysoka wytrzymałość, ograniczona ciągliwość
	2	DP490 (Scotch Weld)	3M	2-składnikowy epoksydowy	1560	34,0	3,5	26	350	Połączenia metal-metal, metal-plastik	Wysoka wytrzymałość, odporność na podwyższoną temperaturę do +120°C
	3	Sika Dur 30	Sika	2-składnikowa żywica epoksydowa	1000	20,0	0,25	31	930	Połączenia stali z betonem, z płytami z włókien węglowych	Zaprawa bezrozpuszczalnikowa
II	4	Körarup 666	Kömmerring	2-składnikowy poliuretanowy	1580	14,0	2,0	11	80	Połączenia metali z drewnem, z plastikiem	Szczególnie zalecany do klejenia aluminium, odpomy na wilgoć
	5	Körarup 672	Kömmerring	2-składnikowy poliuretanowy	840	12,0	12,0	7,5	40	Połączenia metali z plastikiem	Wykorzystywany w połączeniach płyt sandwicznych, odpomy na wilgoć
III	6	Sika Fast 5221	Sika	2-składnikowy akrylowy	67	3,5	60,0	5,3	60	Połączenia elementów narzędziowych i aparaturowych	Szybkoosprawy, sprężysty
	7	Körarup 140	Kömmerring	1-składnikowy poliuretanowy	2,9	1,0	60,0	1,2	0,5	Połączenia metal-metal, metal-drewno, metal-plastik	Do zagruntowanych i polakierowanych elementów metalowych
IV	8	Körarop 240	Kömmerring	1-składnikowy poliuretanowy	17,3	1,8	200,0	2,2	0,875	Połączenia metal-metal	Proponowany do umocowania fasad z blach trapezowych do ryglówki ściemnej

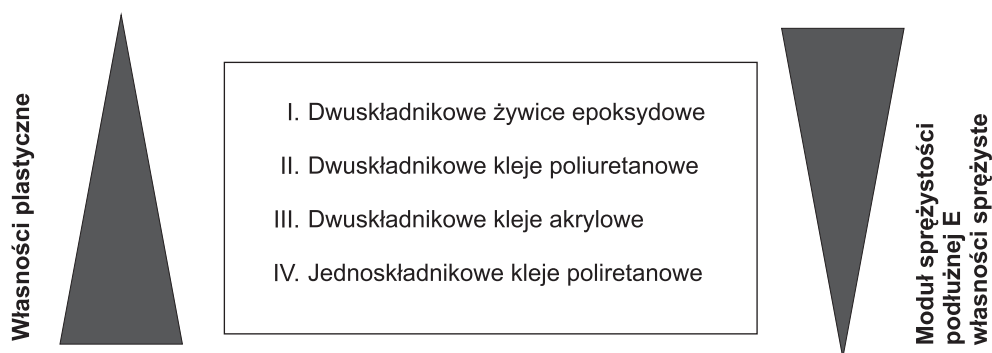
Kleje do metali firmy PROXIMA NTR [41, 66]. Właściwości

Lp.		Wytrzymałość na ścinanie $R_t$ [MPa]	Odporność na podwyższoną temperaturę $T_g$ [°C]	Zastosowanie	Cechy charakterystyczne	Nazwa handlowa
1	Anaerobowe (beztlenowe)	6–45	150–200	Do zabezpieczania połączeń gwintowanych, osadzania łożysk, tulei	Wolne od rozpuszczalników rzadkie płyny po utwardzeniu przechodzą w postać tworzywa, wodoszczelne	Monolith MH 745-3 MH 525-3 MH 995-3 i inne
2	Cyjanoakrylowe	10–30	95	Mocne połączenie stali i aluminium dla małych powierzchni	Wolne od rozpuszczalników, szybko-sprawne	Monolith CM 30-3 CM 70-3
3	Metakrylowe dwuskładnikowe	35	170	Połączenia stali, stali nierdzewnej, miedzi, aluminium	Typowe kleje stosowane w przemyśle lotniczym, samochodowym	MA
4	Epoksydowe dwuskładnikowe	15–24	250	Połączenia blach stalowych, stali ocynkowanej, aluminium, metali kolorowych, tworzyw sztucznych	Wolne od rozpuszczalników, produkowane w postaci płynnej lub pastowej	Monolith EP EP 2523-1 EP 2579-2 EP 2579-1 EP 2522-2
5	Poliuretanowe dwuskładnikowe	25	190	Połączenie stali, aluminium, miedzi, tworzyw sztucznych	Do klejenia dużych powierzchni w przemyśle samochodowym	–

Kleje do wzmacniania konstrukcji firmy Megachemie [53]. Właściwości

Lp.	Nazwa kleju	Typ kleju	Wytrzymałość na rozciąganie $\sigma_m$ [MPa]	Moduł sprężystości podłużnej $E_a$ [GPa]	Temperatura zeszklenia [°C]	Zastosowanie	Wybrane cechy charakterystyczne
1	Neopoxe 30	Modyfikowana żywica epoksydowa dwuskładnikowa	Minimalna 30,0	$11,6 \pm 1,7$	51	Do mocowania powierzchniowego taśm CFRP na różnych podłożach, do przyklejania płaskowników stalowych do konstrukcji żelbetonowych	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Wysoka odporność na pel-zanie</li> <li>– Wysoka odporność na działanie wilgoci</li> <li>– Dobra przyczepność do podłoży różnego typu</li> </ul>
2	Neopoxe 330	Modyfikowana żywica epoksydowa dwuskładnikowa	Minimalna 30,0	4,6	Nie podano	Do mocowania i impregnacji mat z włókien węglowych na różnych podłożach w tym stalowych	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Bardzo duża przyczepność do większości podłoży</li> <li>– Nie wymaga gruntowania</li> </ul>





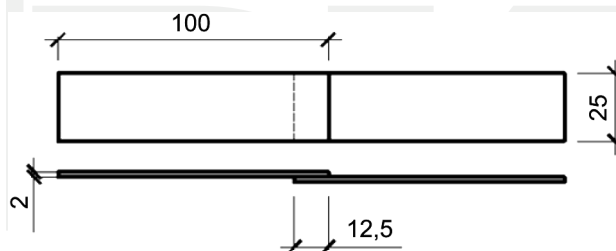
Rys. 3. Własności sprężyste i plastyczne klejów wg tabeli 1

Fig. 3. Elastic and plastic properties of adhesives according to table 1

### 3.2. Własności mechaniczne klejów

Projektowanie połączeń klejonych zasada się na znajomości podstawowych cech mechanicznych kleju, a to: wytrzymałości na ścinanie  $R_t$ , wytrzymałości doraźnej na rozciąganie  $\sigma_{zd}$ , modułu sprężystości podłużnej  $E_a$  i postaciowej  $G_a$  (por. tab. 1).

Wytrzymałość na ścinanie  $R_t$  oznacza się na ogół na próbkach składających się z dwóch płytek metalowych sklejonych na zakładkę jak na rys. 4 [46] i rozciąganych w maszynie wytrzymałościowej przy stałej prędkości aż do całkowitego ścięcia spoiny klejonej (rys. 5). Jest to próba opisana w normie PN-69/C-893000 [64].



Rys. 4. Geometria próbki do badań wytrzymałości kleju na ścinanie [46]

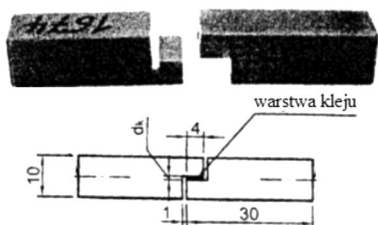
Fig. 4. Geometry of a specimen in shear strength tests of an adhesive [46]



Rys. 5. Próbkę do badań wytrzymałości kleju na ścinanie po zerwaniu [46]

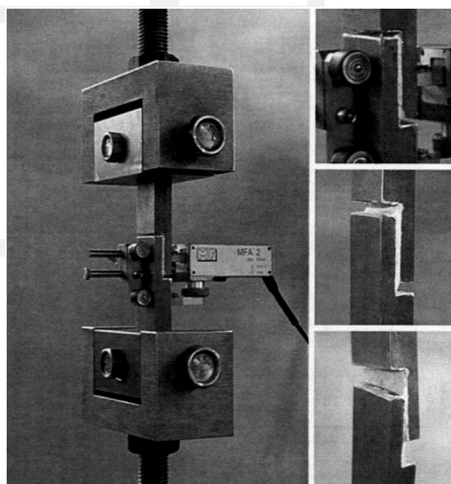
Fig. 5. Specimen in shear strength test of an adhesive after failure [46]

Polska norma [64] nie podaje sposobu określania zależności naprężenia stycznego  $\tau$  od odkształcenia kąowego  $\gamma$  (poślizgu  $\tan \gamma$ ) i modułu sprężystości postaciowej  $G_a$ . Do tego celu można posłużyć się normami niemieckimi, np. DIN EN ISO/DIS 11003-2 [10]. Próbkę złożoną z dwóch płaskowników połączonych cienką warstwą kleju, jak przykładowo na rys. 6 [46], umieszcza się w maszynie wytrzymałościowej i obciąża aż do zniszczenia (rys. 7 [54]).



Rys. 6. Kształt próbek do testów ścinania [46]

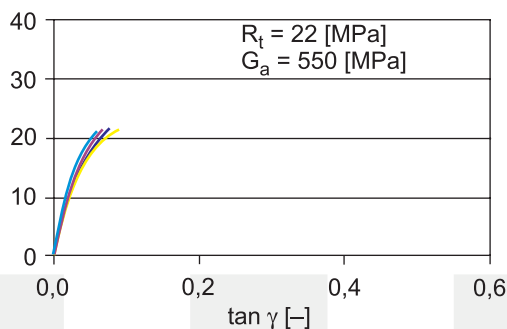
Fig. 6. Shape of specimens in shear tests [46]



Rys. 7. Testy ścinania próbkę w maszynie wytrzymałościowej [54]

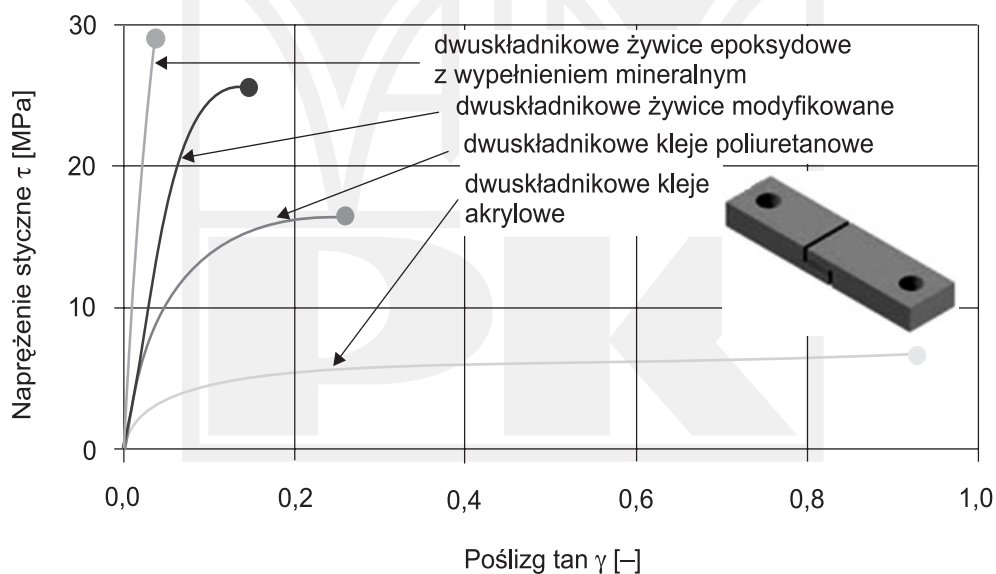
Fig. 7. Shear test of a specimen in the testing machine [54]

Na rys. 8 przedstawiono przykładowe wyniki badań zależności  $\tau$  –  $\tan \gamma$  dla kleju KÖrapox 558 (poz. 1 w tabeli 1) [62], zaś na rys. 9 porównanie ścieżek  $\tau$  –  $\tan \gamma$  dla różnych rodzajów klejów [11] pokazujące ich różne własności sprężysto-plastyczne.



Rys. 8. Zależność naprężenia stycznego  $\tau$  i poślizgu  $\tan \gamma$  dla kleju KÖrapox 558 [62]

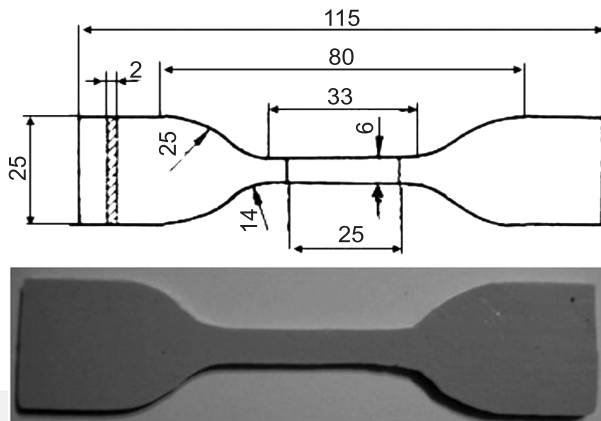
Fig. 8. Relationship between shear stress  $\tau$  and slip  $\tan \gamma$  for the glue KÖrapox 558 [62]



Rys. 9. Porównanie ścieżek równowagi obciążenie ścinające – poślizg dla różnych klejów [11]

Fig. 9. Comparison of different elastic – plastic load – deformation behaviour [11]

Wytrzymałość przy rozciąganiu można określić w oparciu o polską normę PN-81/C-89034 [65] lub np. normę niemiecką DIN EN 26922 [9]. W pracy [46] wykonano testy wytrzymałościowe na próbkach WG [65] pokazanych na rys. 10 i 11, zaś w pracy [54] na próbkach wg [9] pokazanych na rys. 12.



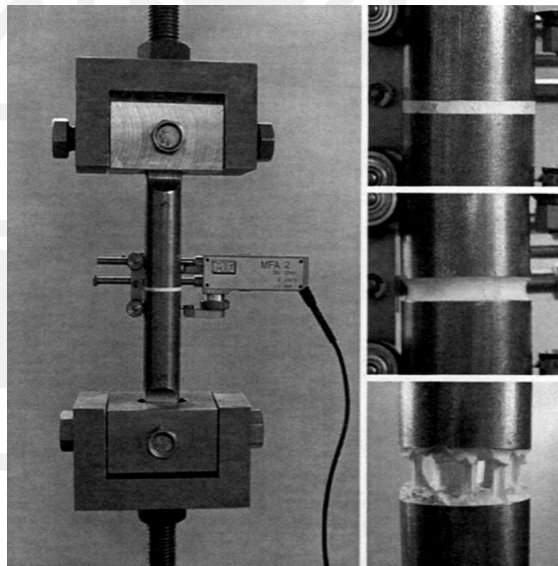
Rys. 10. Próbkę do badań wytrzymałości kleju przy statycznym rozciąganiu [46]

Fig. 10. Specimen of an adhesive in tensile test [46]



Rys. 11. Próba rozciągania. Zerwanie próbki kleju [46]

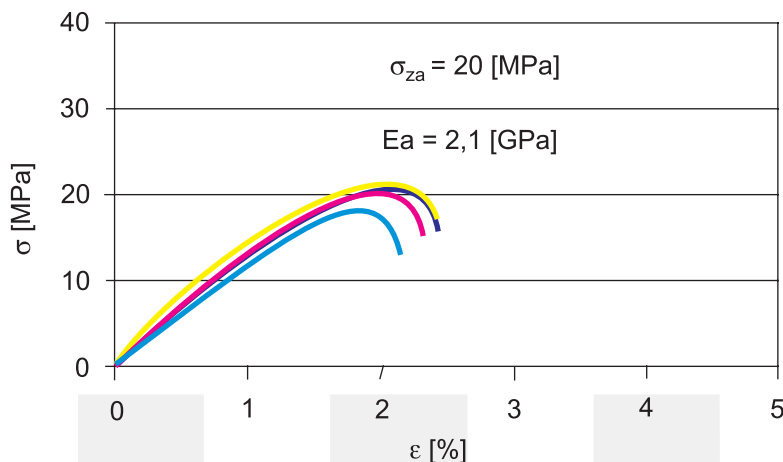
Fig. 11. Tensile test. Failure of a specimen [46]



Rys. 12. Testy próbki kleju na rozciąganie [54]

Fig. 12. Tensile test for an adhesive specimen [54]

Na rys. 13 przedstawiono przykładowe wyniki badań zależności naprężenie normalne  $\sigma$  – odkształcenie liniowe  $\epsilon$  dla kleju Kōrapox 558 (poz. 1 w tabeli 1) [62].

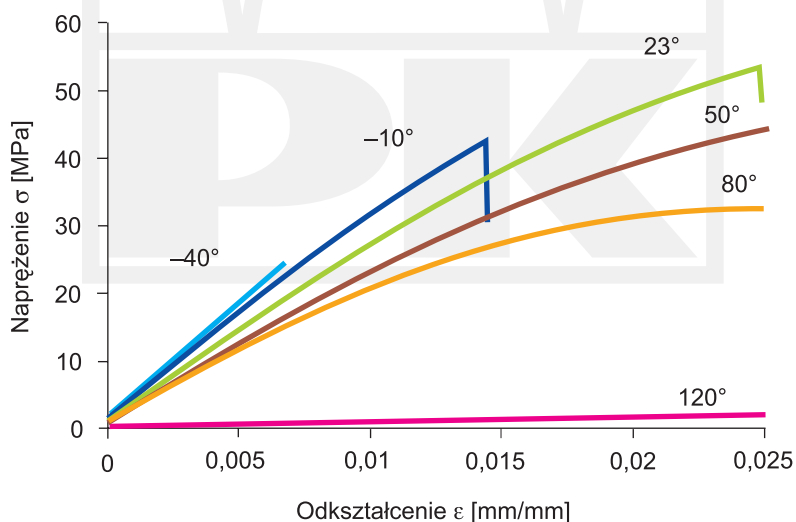


Rys. 13. Zależność naprężenie  $\sigma$  – odkształcenie  $\epsilon$  dla kleju Kōrapox 558 [62]

Fig. 13. Relationship between normal stress  $\sigma$  and strain  $\epsilon$  for the glue Kōrapox 558 [62]

### 3.3. Zależność własności mechanicznych od temperatury

Własności mechaniczne polimerów są ściśle zależne od temperatury i ulegają degradacji w podwyższonej temperaturze, jak to przykładowo pokazuje rys. 14 [11] dla dwuskładnikowej żywicy epoksydowej.



Rys. 14. Zmiana zależności naprężenie–odkształcenie przy zmianie temperatury dla dwuskładnikowej żywicy epoksydowej [11]

Fig. 14. Change of the stress strain behaviour in dependence on the testing temperature [11]

Ważnym parametrem w ocenie przydatności klejów do pracy w podwyższonej temperaturze jest tzw. temperatura zeszklenia ( $T_g$ ), w której żywica zaczyna mięknąć i jej własności mechaniczne ulegają degradacji. W tabeli 4 podano zakresy typowych temperatur zeszklenia dla różnych klejów konstrukcyjnych [8].

Producenci stale podnoszą parametry pracy klejów ( $T_g$ ) w zwiększonej temperaturze (por. tab. 2).

Tabela 4

**Temperatury zeszklenia dla klejów konstrukcyjnych [8]**

Lp.	Typy kleju	Temperatura zeszklenia $T_g$ [°C]
1	Poliuretanowe	< 80
2	Akrylowe	< 80
3	Epoksydowe 2-składnikowe ulepszone	60–80
4	Epoksydowe 1-składnikowe nitrylowe	90–120
5	Epoksydowe 1-składnikowe modyfikowane	100–150
6	Epoksydowe fenolowe	150–200
7	BMI (bismaleimidowe)	200–300
8	Cyjano-estry	250–300
9	Poliamidy	280–330

## 4. Zasady stosowania połączeń klejonych

### 4.1. Dobór kleju

Doboru kleju dokonuje się, uwzględniając następujące czynniki:

- rodzaj powierzchni łączonych (np. ocynowana lub nieocynkowana),
- narażenie złącza na korozję, w szczególności wilgoć, zasolenie,
- praca złącza w obniżonej lub podwyższonej temperaturze (poniżej  $-30^{\circ}\text{C}$  i powyżej  $90^{\circ}\text{C}$ ),
- łatwość układania złączy,
- koszty (w szczególności w porównaniu ze spawaniem),
- własności mechaniczne, skurcz, pełzanie, odporność na starzenie się [3] na ogół wg wskazań producenta (por. tabele 1, 2, 3 – zastosowanie).

## 4.2. Technologia wykonywania złączy klejonych

Technologia wykonywania złączy klejonych obejmuje [37]:

- przygotowanie powierzchni,
- przygotowanie kleju,
- ewentualne gruntowanie powierzchni sklejących,
- nanoszenie kleju,
- ewentualne wstępne suszenie kleju,
- scalanie z zastosowaniem odpowiedniego nacisku,
- utwardzanie kleju i kondycjonowanie skleiny,
- wykończanie połączenia, ewentualne powlekanie tzw. primerami [3],
- kontrolę połączenia.

Wymagania w tym zakresie ustala za ogół producent kleju, np. [7, 66]. Szczególne znaczenie dla wytrzymałości i odporności skleiny ma przygotowanie powierzchni materiału klejonego.

W tabeli 5 podano przegląd stosowanych w tym celu metod dla stopów aluminium [8].

W przypadku stali konstrukcyjnej dobre rezultaty w zakresie przygotowania powierzchni do klejenia otrzymuje się, wykorzystując ścieranie lub szorstkowanie, np. techniką strumieniowo-cierną z oczyszczaniem strumieniem suchego powietrza. Cienkie elementy można trawić kwasami azotowo-fosforowymi.

Tabela 5

### Metody przygotowania powierzchni klejonych dla stopów aluminium [8]

Kategoria	Sposób przygotowania powierzchni
Chemiczna lub elektrochemiczna	Odtłuszczenie Trawienie (CSA, FPL) <sup>1)</sup> Anodowanie (PAA, CAA/PSA) <sup>2)</sup> Powlekanie konwersyjne (chromianami, tytanianami, tlenkami cyrkonu)
Mechaniczna	Szlifowanie, czyszczenie, szczotkowanie, oczyszczanie strumieniowo – cierne przy użyciu korundu (usuwanie tlenku aluminium)
Zastosowanie promotorów przyczepności	Użycie silanów (krzemometanów), zol-żelów, primerów

<sup>1)</sup>CSA – kwas chromowy i siarkowy, FPL – Forest Products Laboratory (nazwa własna procesu trawienia),

<sup>2)</sup>PAA – anodowanie kwasem fosforowym, CAA – anodowanie kwasem chromowym, PSA – anodowanie kwasem fosforowo-siarkowym

Stale trudnordzewiejące lub nierdzewne (zazwyczaj chromowe) wymagają wykorzystania procesów chemicznych lub elektrochemicznych z użyciem wytrawiaczy kwasowych i mechanicznego usuwania warstwy wytrawionej. Tytan i jego stopy używane w przemyśle lotniczym poddawane są zazwyczaj wstępnemu ścieraniu mechanicznemu, ale stosowane są także pozostałe techniki przygotowania powierzchni ujęte w tab. 5 jak dla aluminium. Ostatnim osiągnięciem w tej dziedzinie jest użycie tzw. zol-żelów (koncern Boeing). Oczyszczone mechanicznie powierzchnie zapuszcza się zolem, który jest mieszaniną silanu (krzemometanu) glicydoksalowego i alkoksydu cyrkonu. Na powierzchni metalu tworzy się cienka warstwa chemicznie z nim związana, która jest jednocześnie aktywną w łączeniu się z epoksydowym primerem. Zol-żel dostępny na rynku to AC – 130 firmy AC TECH [8].

#### 4.3. Zasady ogólne projektowania połączeń klejonych

W projektowaniu konstrukcji klejonych należy:

- zagwarantować wystarczającą powierzchnię klejoną dla przeniesienia obciążeń,
- unikać obciążeń rozdzierających i rozszczepiających (por. rys. 15),
- zastępować naprężenia rozciągające przez ściskające (por. rys. 15),
- unikać koncentracji naprężeń w skleinie przez ich odpowiednie kształtowanie (por. rys. 16).

##### Naprężenia równomiernie rozłożone



##### Naprężenie nierównomiernie rozłożone i złożony stan naprężenia



Rys. 15. Korzystne i niekorzystne obciążenia sklein [54]

Fig. 15. Advantageous and disadvantageous loading on adhesive joints [54]



Typ złącza		Rysunek	Symbol		Typ złącza	Rysunek	Symbol
Połączenia blach	Doczołowe			Połączenia rurowe	Wałkowe równoległe		
	Ukośne		//		Wałkowe zbieżne		
	Schodkowe		└┘				
	Doczołowe z pojedynczą nakładką		— —		Teowe		
	Doczołowe z podwójną nakładką		— —		Teowe z rowkiem		
Połączenia rurowe				Połączenia kątowe	Kątownikowe zewnętrzne		
	Tulejowe (wewnętrznie)				Kątownikowe wzmacniane zewnętrzne		
	Tulejowe podwójne				Kątownikowe wewnętrzne		
	Zakładkowe rurowe				Kątownikowe wzmacniane wewnętrzne		

Rys. 16. Dobór właściwego połączenia i techniki klejenia [8]

Fig. 16. Choice of appropriate connections and glueing technique [8]

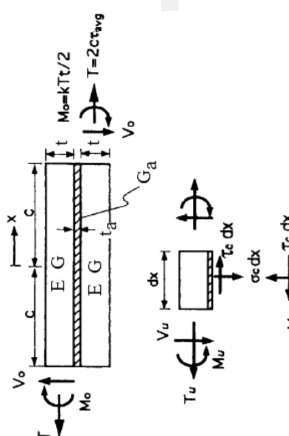
## 5. Metody obliczeń połączeń klejonych

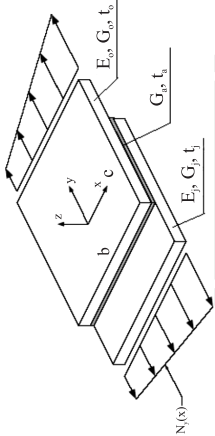
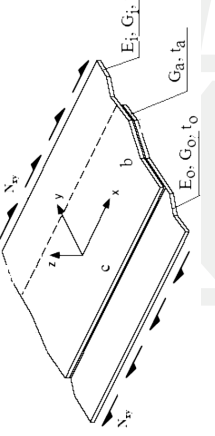
### 5.1. Metody analityczne

Zamknięte rozwiązania analityczne otrzymano dla określonych przypadków geometrii i obciążenia połączeń przy wielu założeniach upraszczających. Tabela 6 przedstawia podstawowe metody analityczne obliczania klejonych połączeń zakładkowych.

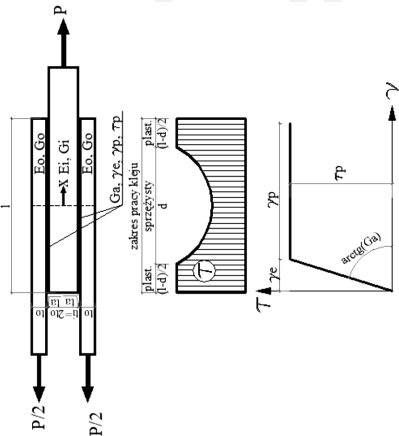
Metody analityczne obliczeń klejonych połączeń zakładkowych. Podstawowe zależności

Lp.	Rodzaj połączenia i autor rozwiązania	Rysunek	Podstawowe założenia	Podstawowe związki
1	2	3	5	
1	Połączenie jednozakładkowe Volkeresen [70], Oplinger i inni [69]		<p>– spoina klejowa i elementy klejone zachowują się jak ciała linowo-sprężyste,</p> <p>– elementy klejone we wszystkich przekrojach podlegają równomiernemu rozciąganiu, – mimośrodowość działania obciążenia, powodująca zmianie elementów łączonych, nie ma wpływu na rozkład naprężeń stycznych w spoinie klejowej, – uwzględnia się odkształcenia postaciowe elementów klejonych</p>	$\tau_c(x) = A \sin h(\beta x) + B \cos h(\beta x),$ $A = \frac{\beta \tau_{\text{avg}}}{\cos h(\beta c)} \cdot \left[ \frac{E_1 t_0}{1 - E_1 t_0} \cdot \frac{E_0 t_0}{E_1 t_0} \right],$ $B = \frac{\beta \tau_{\text{avg}}}{\cos h(\beta c)},$ $\beta^2 = \frac{G_0}{t_0} \left( \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_0} \right),$ $\lambda^2 = \frac{G_0}{t_0} \left( \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_0} \right),$ $\alpha^2 = \frac{1}{\left[ 1 + \frac{G_0}{t_0} \left( \frac{t_0}{E_1} + \frac{t_0}{3G_0} \right) \right]}$ <p>gdzie:  <math>E_0, E_1, G_0, G_1, t_0, t_1</math> – moduły sprężystości podłużnej, poprzecznej i grubości elementów łączonych,  <math>G_0, t_0</math> – moduł sprężystości poprzecznej i grubość warstwy kleju,  <math>2c</math> – długość połączenia klejonego,  <math>\tau_{\text{avg}}</math> – średnie naprężenia styczne w warstwie kleju,  <math>T</math> – siła rozciągająca połączenie.</p>

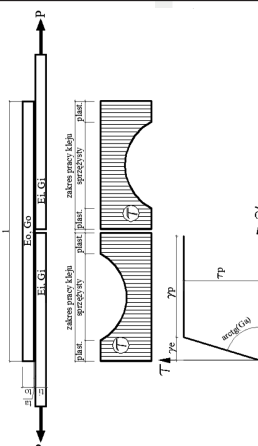
2	<p>Połączenie jednozakładowe z uwzględnieniem zginania Goland i Reissner [31], Oplinger i inni [69]</p>	 <p>Napężenia w zrównoważonym połączeniu zakładkowym</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– uwzględnienie naprężeń od zginania elementów klejonych wywołanych mimosrodowścią obciążenia złącza zakładkowego,</li> <li>– uwzględnienie odkształceń postaciowych elementów klejonych</li> </ul>	$\tau_c(x) = \frac{\tau_{avg}}{4} \left[ \frac{\beta c}{t} (1+3k) \frac{\cos h \left( \frac{\beta c x}{t} \right)}{\sin h \left( \frac{\beta c}{t} \right)} + 3(1-k) \right],$ $k = \frac{2M_c}{Tt}, \quad \beta^2 = \frac{8G_c}{E_c} \left[ \frac{1}{1 + \frac{2G_c t}{3t_c G}} \right],$ $\beta = \alpha^2 \lambda^2, \quad \lambda^2 = \frac{8G_c}{Et_c}, \quad \alpha^2 = \frac{1}{1 + \frac{2G_c t}{3t_c G}}$ <p>gdzie:</p> <p><math>E, G, t</math> – moduły sprężystości podłużnej, poprzecznej i grubości elementów łączonych,  <math>G_c, t_c</math> – moduł sprężystości poprzecznej i grubość warstwy kleju,  <math>2c</math> – długość połączenia klejonego,  <math>\tau_{avg} = T/2c</math> – średnie naprężenia styczne w warstwie kleju,  <math>T</math> – siła rozciągająca połączenie.</p> $\sigma_c(x) = \frac{Tt^2}{c^2 R_1} \left[ R_2 \lambda^2 \frac{K}{2} + \lambda K \cos h \lambda \cos \lambda \right] \cos h \frac{\lambda x}{c} \cos \frac{\lambda x}{c} + \left[ R_2 \lambda^2 \frac{K}{2} + \lambda K \sin h \lambda \sin \lambda \right] \sin h \frac{\lambda x}{c} \sin \frac{\lambda x}{c}$ $\lambda = \gamma \frac{c}{t}, \quad \gamma^2 = 6 \frac{E_c t}{E t_c}, \quad K = K \frac{c}{t} \left[ \frac{3(1-\nu^2) T}{E} \right],$ $K = \frac{1}{1 + 2\sqrt{2}gh} \left( \frac{c}{t} \sqrt{\frac{3Y}{2L}} (1-\nu^2) \right),$ $R_1 = \cos h \lambda \sin \lambda + \sin h \lambda \cos \lambda,$ $R_2 = \sin h \lambda \cos \lambda + \cos h \lambda \sin \lambda, \quad R_3 = \frac{\sin h 2\lambda + \sin 2\lambda}{2},$ <p>gdzie:</p> <p><math>E, G, \nu, t</math> – moduły sprężystości podłużnej, poprzecznej, współczynnik Poissona i grubość elementów łączonych,  <math>E_c, t_c</math> – moduł sprężystości podłużnej i grubość warstwy kleju,  <math>2c</math> – długość połączenia klejonego,  <math>\tau_{avg} = T/2c</math> – średnie naprężenia styczne w warstwie kleju,  <math>T</math> – siła rozciągająca połączenie.</p>
---	---	--	--	---

<p>3</p>	<p>Połączenie jednozakładkowe obciążone niemożliwo do wzdłuż szerokości (ze zmienną siłą rozciągającą). Kim i Kedward [44]</p>	 <p>Połączenie zakładkowe ze zmienną siłą rozciągającą</p>	<p>– założenia jak w poz. 2 ale ze zmienną liniowo siłą rozciągającą</p>	$\tau_{xz}^{(x)} = t_0 \lambda_0 \left[ \frac{\sin h(\lambda_0 y)}{\cos h(\lambda_0 c)} \left( \frac{N_1(x)}{2t_0} \frac{D_0}{\lambda_0^2} + \sin h(\lambda_0 y) \frac{N_1(x)}{2t_0} \right) \right]$ $\lambda = \sqrt{\frac{G_1}{t_1} \left( \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_0} \right) + \frac{G_0}{t_0} \frac{N_1(x)}{E_1 t_0}}$ $N_1(x) = \sigma_1^0(x) t_0$ <p>gdzie:  <math>E_0, E_1, t_0, t_1</math> – moduły sprężystości podłużnej i grubości elementów łączonych,  <math>G_0, G_1</math> – moduł sprężystości poprzecznej i grubość warstwy kleju,  <math>b, c</math> – szerokość i długość połączenia klejonego,  <math>N_1(x)</math> – siła normalna,  <math>\tau_{xz}^0</math> – naprężenia styczne w warstwie kleju.</p>
<p>4</p>	<p>Połączenie jednozakładkowe obciążone stycznie równoległe do szerokości (Hart – Smith [35], Kim i Kedward [44])</p>	 <p>Połączenie zakładkowe o długości większej od szerokości</p>	<p>– obciążenie styczne równoległe do szerokości złącza          – długość połączenia większa od szerokości          – zmienne wartości siły stycznej</p>	$\tau_{xy}^{(y)} = t_0 \lambda_0 (A_0 \sin h \lambda y + B_0 \cos h \lambda y)$ $A_0 = \frac{1}{\cos h \lambda c} \left( \frac{N_p}{2t_0} \frac{C_0}{\lambda^2} \right), \quad B_0 = \frac{N_p}{2t_0} \sin h \lambda c$ $\lambda = \sqrt{\frac{G_1}{t_1} \left( \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_0} + \frac{1}{G_1} \right)}, \quad C_0 = \frac{G_0 N_p}{G_1 t_1 t_0}, \quad N_p = \tau_{xy}^0 t_0$ <p>gdzie:  <math>G_0, G_1, t_0, t_1</math> – moduły sprężystości poprzecznej i grubości elementów łączonych,  <math>G_0, G_1</math> – moduł sprężystości poprzecznej i grubość warstwy kleju,  <math>b, c</math> – szerokość i długość połączenia klejonego,  <math>N_p</math> – siła styczna,  <math>\tau_{xy}^0, \tau_{xy}^0</math> – naprężenia styczne w łączonym elemencie zewnętrznym i wewnętrznym,  <math>\tau_{xy}^0</math> – naprężenia w warstwie kleju.</p>

5	<p>Połączenie dwuzakładowe, wg. de Brugne [5], Oplinger i inni [69]</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>– spoina klejowa i elementy klejone zachowują się jak ciała liniowo sprężyste,</li> <li>– elementy klejone we wszystkich przekrojach podlegają równomiernemu rozciąganiu, mimośrodowość działania obciążenia, powodująca zginanie elementów łączonych, nie ma wpływu na rozkład naprężeń stycznych w spoinie klejowej, uwzględnia się odkształcenia postaciowe elementów klejonych</li> </ul>	$\tau_c(x) = A \sin k(\beta x) + B \cos k(\beta x),$ $A = \frac{\beta c \tau_{avg}}{\cos k(\beta c)} \left[ \frac{1 - E_1 I_1}{2 E_0 I_0} \frac{E_1 I_1}{E_0 I_0} + \frac{\beta c \tau_{avg}}{\sin k(\beta c)} \right], \quad B = \frac{\beta c \tau_{avg}}{\sin k(\beta c)},$ $\beta^2 = \frac{G_1 \left( \frac{2}{t_0} + \frac{1}{E_0 I_0} \right)}{1 + \frac{G_1}{t_0} \left( \frac{l_0}{6G_1} + 3G_0 \right)},$ $\beta = \alpha^2 \lambda,$ $\lambda^2 = \frac{G_1 \left( \frac{2}{t_0} + \frac{1}{E_0 I_0} \right)}{t_0 \left( \frac{l_0}{6G_1} + 3G_0 \right)},$ $\alpha^2 = \frac{1}{1 + \frac{G_1}{t_0} \left( \frac{l_0}{6G_1} + 3G_0 \right)}$ <p>gdzie:  <math>E_0, E_1, G_0, G_1, t_0, l_0</math> – moduły sprężystości podłużnej, poprzecznej i grubości elementów łączonych,  <math>G_0, t_0</math> – moduł sprężystości podłużnej i grubość warstwy kleju, <math>2c</math> – długość połączenia klejonego,  <math>\tau_{avg} = T/4c</math> – średnie naprężenia ścisne w warstwie kleju,  <math>T</math> – siła rozciągająca połączenie</p>
Rozkład naprężeń w połączeniu dwuzakładowym				

6	<p>Połączenie dwuzakładkowe w zakresie sprężysto-plastycznym pracy kleju, wg. Hart – Smith [36]</p>		<p>– klej pracuje w zakresie sprężysto-plastycznym, – pozostałe założenia jak w poz. 5</p>	<p>Równanie różniczkowe rządzące zagadnieniem:</p> $\frac{d^2\gamma}{dx^2} - \frac{1}{l} \left( \frac{1}{E_o G_o} + \frac{2}{E_i G_i} \right) \tau = 0, \quad \gamma = \frac{\tau}{G_o} \frac{d^2\tau}{dx^2} - \beta^2 \tau = 0,$ $\tau_c(x) = A \sin h(\beta x) + B \cos h(\beta x), \quad \beta = \frac{2\tau_p}{E_o G_o l \gamma_c},$ <p>gdzie:</p> <p>A, B – stałe jak dla rozwiązania de Brugne'a,  <math>E_o, E_i, G_o, G_i, \tau_p, l</math> – moduł sprężystości poprzecznej i grubość warstwy kleju,  <math>\gamma_c, \gamma_p, \tau_c</math> – odpowiednio odkształcenia kątowe kleju w zakresie sprężystym i plastycznym oraz plastyczne naprężenia styczne kleju.                  Zakres plastyczny (długość (1-d)/2):</p> $\gamma = A \left( \frac{\beta^2}{2G_o} \right) \tau_p \xi^2 + C \xi + F, \quad F = \gamma_p = \frac{\tau_p}{G_o},$ $A = \frac{\tau_p}{\cos h \left( \frac{\beta d}{2} \right)}, \quad C = \left( \frac{\beta \tau_p}{G_o} \right) \tan h \left( \frac{\beta d}{2} \right),$ $\tau_c(x) = \tau_p \sqrt{1 + 2 \frac{\gamma_c}{\gamma_p}},$ <p>Zakres strefy plastycznej dla połączeń od długości <math>\tan h(\beta d/2) \rightarrow 1</math>:</p> $\beta \left( \frac{1-d}{2} \right) \cong \sqrt{1 + 2 \frac{\gamma_c}{\gamma_p} - 1},$ <p>gdzie: <math>E_o, E_i, G_o, G_i, \tau_p, l</math> – moduły sprężystości podłużnej, poprzecznej i grubości elementów łączonych,  <math>G_o, \tau_p</math> – moduł sprężystości poprzecznej i grubość warstwy kleju, <math>\gamma_c, \gamma_p, \tau_c</math> – odpowiednio odkształcenia kątowe kleju w zakresie sprężystym i plastycznym oraz plastyczne naprężenia styczne kleju, <math>dx=d\xi</math>.</p>
<p>Klejone połączenie dwuzakładkowe w analizie sprężysto-plastycznej</p>				

6a	<p>Połączenia dwuzakładkowe w zakresie sprężysto-plastycznym pracy kleju z uwzględnieniem własności termicznych kleju</p>		<p>- w analizie rozkładu naprężeń stycznych w połączeniu klejonym uwzględnia się różnicowane własności termiczne (współczynnik rozszerzalności temperaturowej)</p>	$\tau_x(x) = A \sin h(\beta x) + B \cos h(\beta x),$ $A = \frac{\beta \sigma_{\text{adm}}}{\cos h(\beta l)} \left[ \frac{1 - \frac{E_f t_f}{2E_{f_0} t_f}}{1 + 2E_{f_0} t_f} + \frac{(\alpha_p - \alpha_f) \Delta T \beta}{\left( \frac{1}{E_{f_0} t_f} + \frac{1}{E_{f_0} t_f} \right) \cos h(\beta l)} \right],$ $B = \frac{\beta \sigma_{\text{adm}}}{\sin h(\beta l)}, \quad \beta^2 = \frac{G_f}{t_f} \left( \frac{2}{E_{f_0} t_f} + \frac{1}{E_{f_0} t_f} \right),$ <p>gdzie:</p> <p><math>E_f, E_p, G_f, G_p, t_f, t_p</math> – moduły sprężystości podłużnej, poprzecznej i grubości elementów łączonych,  <math>G_f, t_f</math> – moduł sprężystości poprzecznej i grubość warstwy kleju,  <math>\alpha_p, \alpha_f</math> – współczynniki rozszerzalności termicznej elementów łączonych,  <math>\Delta T</math> – różnica temperatury.</p>
----	---	--	--	---

<p>7</p> <p>Połączenie zakładkowe wyznaczenie nośności, wg. Davis, Bond [4], Oplinger [69]</p>	 <p>Połączenie jednokładkowe – rozkład naprężeń stycznych <math>\tau</math> w warstwie kleju.</p>	<p>– pomija się naprężenia normalne i termiczne, – wyznacza się nośność połączenia</p>	<p>Nośność <math>P = \min\{P_1, P_2\}</math></p> $P_1 = \sqrt{2t_p \tau_p \left( \frac{1}{2} \gamma_c + \gamma_p \right) E_1 t_i \left( 1 + \frac{E_1 t_i}{E_2 t_o} \right)}$ $P_2 = \sqrt{2t_p \tau_p \left( \frac{1}{2} \gamma_c + \gamma_p \right) E_2 t_o \left( 1 + \frac{E_2 t_o}{E_1 t_i} \right)}$ <p>gdzie: <math>E_1, E_2, E_p, t_{op}, t_i, t_o</math> – moduły sprężystości podłużnej i grubości elementów łączonych, <math>t_o</math> – grubość warstwy kleju, <math>\gamma_c, \gamma_p, \tau_p</math> – odpowiednio odkształcenia kątowe kleju w zakresie sprężystym i plastycznym oraz plastyczne naprężenia styczne kleju.</p>
--	---	--	--

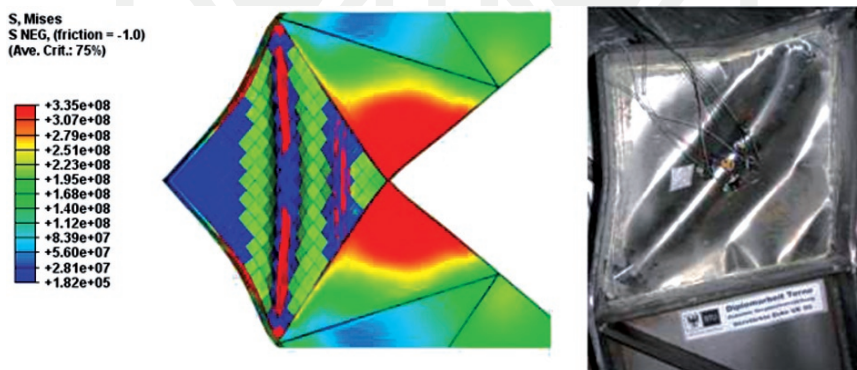


## 5.2. Metody numeryczne

W przypadku bardziej skomplikowanej geometrii połączeń równania różniczkowe opisujące ich zachowanie się pod obciążeniem w analizie nieliniowej można rozwiązać numerycznie przy użyciu metody różnic skończonych, jednakowoż równania wyprowadzone są nadal przy założeniach upraszczających i liczba rozwiązanych przypadków jest ograniczona [8].

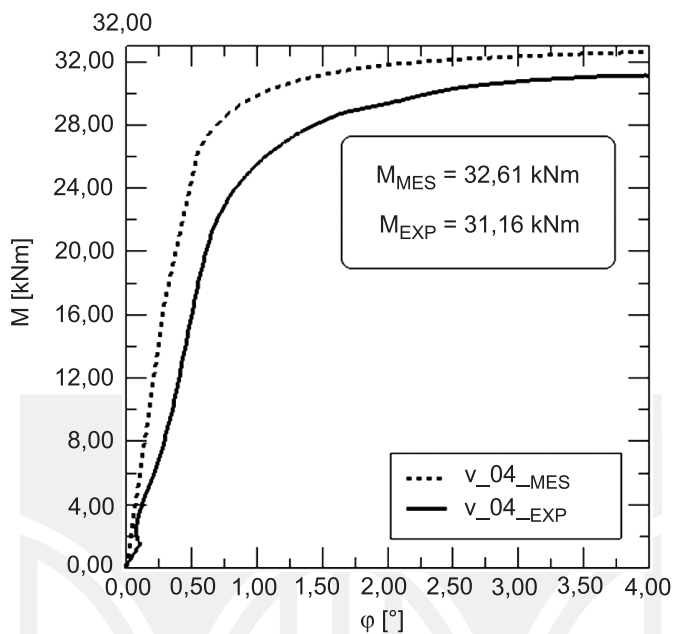
Dopiero metoda elementów skończonych pozwala na pełne przestrzenne modelowanie połączenia z uwzględnieniem sprężysto-plastycznego zachowania się kleju i elementów łączonych. Metoda ta wykorzystywana jest obecnie coraz częściej [8, 46, 48, 54, 60], ale wymaga dobrej znajomości zarówno zasad budowy modelu jak i prowadzenia analizy z uwzględnieniem na ogół jego optymalizacji przez zagęszczenie siatki elementów w wybranych obszarach.

Należy mieć tu także na względzie weryfikację otrzymanego rozwiązania, na ogół przy użyciu programów komercyjnych takich jak ANSYS, ABAQUS czy DIANA, której dokonać można w pełni w drodze porównania otrzymanego rozwiązania numerycznego z wynikami badań doświadczalnych [59, 60], jak to pokazano na rys. 17 i 18 w odniesieniu do wzmacnianego naroża ramy blachownicowej oraz na rys. 19 i 20 dla wzmacnianej blachownicy skrzynkowej (por. pkt 6.3).



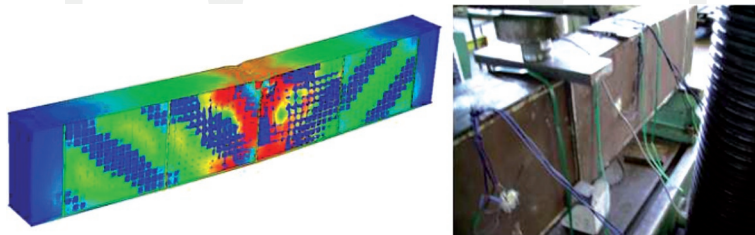
Rys. 17. Model numeryczny (ABAQUS) i doświadczalny wzmacnianego naroża ramy w fazie zniszczenia [59, 60]

Fig. 17. Numerical (ABAQUS) and experimental models of a reinforced knee joint of a frame in the phase of failure [59, 60]



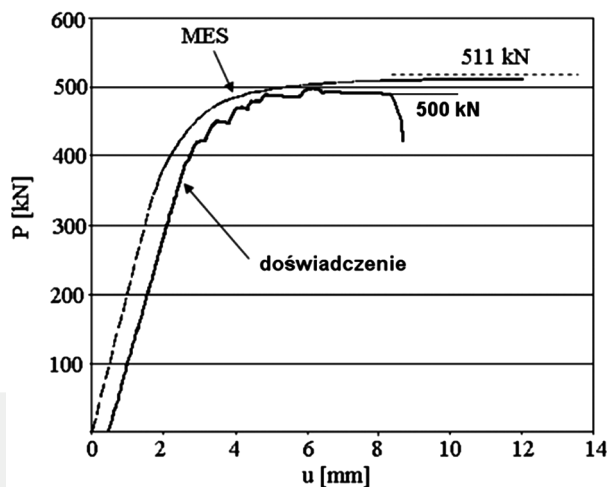
Rys. 18. Doświadczalna weryfikacja obliczeń numerycznych wzmocnionego naroża ramy [59, 60]

Fig. 18. Experimental verification of numerical calculations for the reinforced knee joint of a frame [59, 60]



Rys. 19. Model numeryczny (ABAQUS) i doświadczalny wzmocnionego dźwigara skrzynkowego w fazie zniszczenia [59, 60]

Fig. 19. Numerical (ABAQUS) and experimental models of a reinforced box – girder in the phase of failure [59, 60]



Rys. 20. Doświadczalna weryfikacja obliczeń numerycznych wzmocnionego dźwigara skrzynkowego [59, 60]

Fig. 20. Experimental verification of numerical calculations of the reinforced box – girder [59, 60]

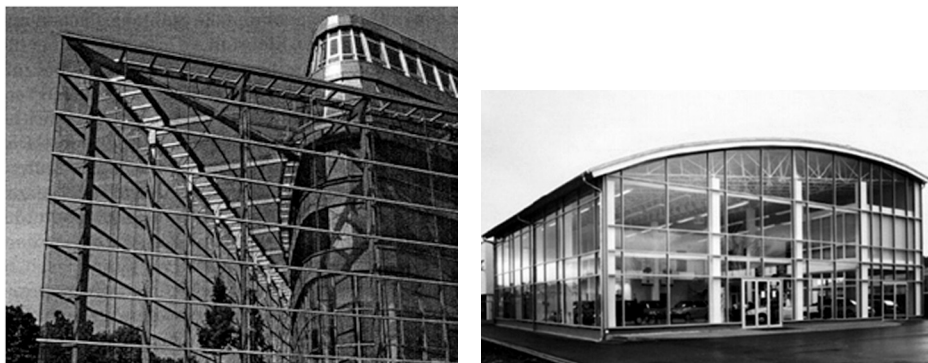
### 5.3. Opracowania normowe i inżynierskie

Dla potrzeb inżynierskich wykorzystuje się z reguły opracowania normowe lub podręcznikowo–poradnikowe, pozwalające na szybkie i bezpieczne projektowanie połączeń klejonych. W tym zakresie brak jest, na co wskazuje wielu autorów [2, 46, 54], jakichkolwiek przepisów normowych opartych na założeniach eurokodów (te są dopiero tworzone [58]). Istnieje wszakże szereg opracowań szczegółowych pozwalających na projektowanie wybranych konstrukcji klejonych, takich jak np. fasady szklane na nośnym szkielecie metalowym [1, 32] czy elementy cienkościenne [6, 33, 55]. Ponadto doraźnie tworzone są opracowania dla sprawdzenia nośności różnych typów połączeń, z których większość została przedstawiona w tym opracowaniu.

## 6. Przykłady zastosowań połączeń klejonych w konstrukcjach metalowych

### 6.1. Fasady na szkielecie metalowym

Fasady szklane to konstrukcje, w których technikę klejenia (głównie klejami silikonowymi) wykorzystuje się z powodzeniem dla poprawienia estetyki, lekkości i przejrzystości budowli (rys. 21), czego przykłady podane są m. in. w pracach [2, 7, 52, 54, 62, 76]. Fasady, które nie są obciążone długotrwałym obciążeniem statycznym, a jedynie ciężarem własnym i krótkotrwałym obciążeniem od wiatru, stwarzają szerokie pole do zastosowania klejenia dla ich zamocowania.



Rys. 21. Przykłady współczesnych fasad szklanych na ryglówce metalowej [7, 62]

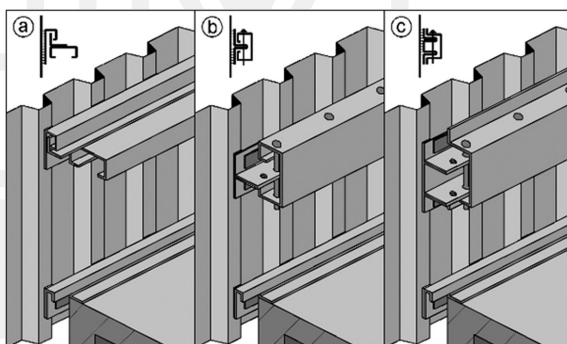
Fig. 21. Examples of modern glass facades on metal skeleton [7, 62]

W pracy [54] wskazano na nowe możliwości kształtowania fasad z blach profilowanych, które są przyklejone do metalowego szkieletu nośnego (rys. 22).



Rys. 22. Fasada z blachy profilowanej klejonej do szkieletu [54]

Fig. 22. Facade from folded sheet glued to the skeleton [54]



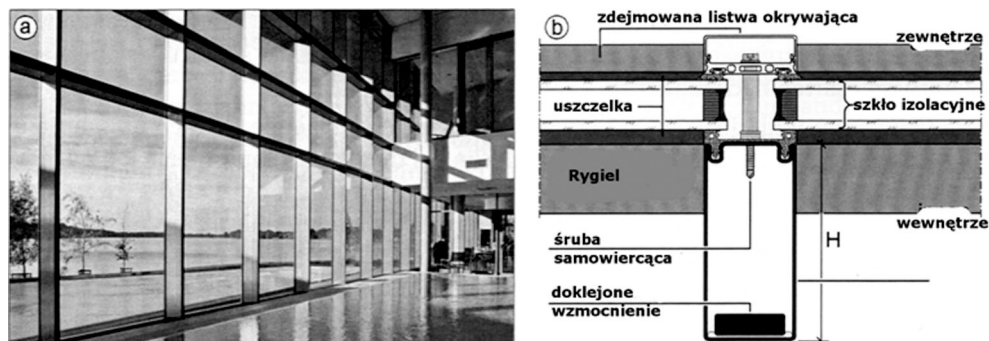
Rys. 23. Warianty mocowania fasady z blachy trapezowej do ryglówki za pomocą klejenia [54]

Fig. 23. Alternative ways of bounding of the folded sheet facade to the skeleton with use of adhesives [54]

Na rys. 23 wskazano trzy warianty a–c mocowania fasady z blachy trapezowej. W wariantach b i c zastosowano do umocowania rygli łączniki mechaniczne, podczas gdy wariant a jest połączeniem czysto klejonym. Do połączeń tego typu nie zaleca się stosować klejów epoksydowych a raczej bardziej plastyczne kleje poliuretanowe i akrylowe. Analiza zachowania się połączeń klejonych szklanych fasad z metalowym szkieletem dokonana w pracy [2] wykazała, że połączenia te zachowują się bez zastrzeżeń w temperaturze od  $-25^{\circ}\text{C}$  do  $+90^{\circ}\text{C}$  nawet pod wielokrotnie zmiennym obciążeniem. Są one jednakże wrażliwe na szybkość obciążania i ukryte wady materiałowe kleju, np. pęcherze powietrza. Dotychczasowa praktyka wykazuje wieloletnią trwałość takich połączeń nawet do 30 lat.

## 6.2. Kształtowniki gięte na zimno z blach i ich wzmacnianie

Fasady nowoczesnych budynków opierają się zwykle na konstrukcji słupowo-ryglowej, czego przykład pokazuje tu szczegółowo rys. 24 [54].



Rys. 24. Przykład konstrukcji wsporczej słupowo-ryglowej fasady i szczegóły konstrukcyjne [54]

Fig. 24. Example of beam – column supporting system of a facade and structural details [54]

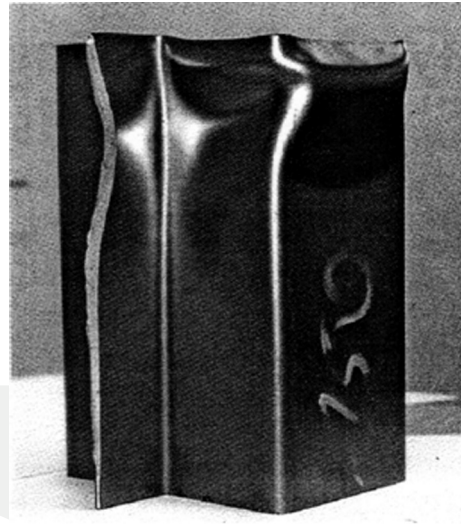
Zastosowano w tym rozwiązaniu doklejane wzmocnienie słupka wykonanego z kształtownika giętego na zimno z blachy o grubości 2,5 mm. Dzięki temu zredukowano smukłość ścianek tego kształtownika, jednocześnie ograniczając jego przemieszczenia, przez co stało się możliwe zastosowanie większych szerokości i długości pól fasady. Z wniosków przedstawionych w pracy [54] wynika, że stopień wzmocnienia kształtownika w przypadku przedstawionego na rys. 24 wzmocnienia jednostronnego nie powinien przekraczać 10% pola powierzchni przekroju kształtownika.

W pracy [63] przedstawiono wyniki badań niszczących tzw. *crashtestu* dla przekrojów kapeluszowych łączonych w pary za pomocą spawania proszkowego (rys. 25 po lewej) i klejenia (rys. 25 po prawej). Wyniki badań wskazują na większe możliwości dyssypacji energii w przypadku połączeń klejonych. W odniesieniu do słupów z kształtowników klejonych, to testy zniszczeniowe przeprowadzone na próbkach o grubościach 1,0 i 1,5 mm wskazują na dobrą nośność sklejin i zniszczenie skutkiem utraty stateczności miejscowej słupów a nie samej skleiny [63] (rys. 26).



Rys. 25. Badania niszczące ściskanych przekrojów kapeluszowych zestawionych w parę [63]

Fig. 25. Crash – tested double hat – profile [63]

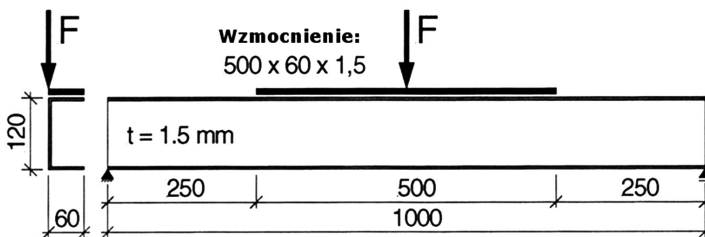


Rys. 26. Słup z klejonych kształtowników cienkościennych [63]

Fig. 26. Adhesive bounded light – weight column [63]

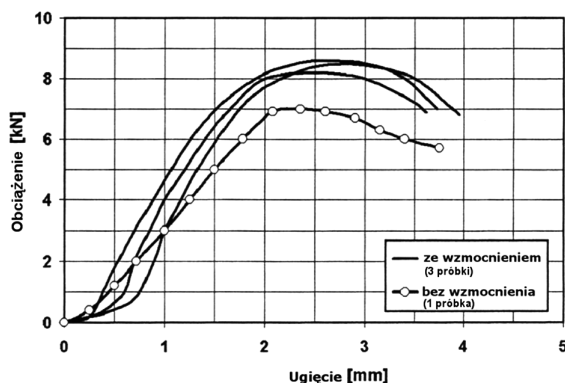
Kolejne doświadczenie przeprowadzone tym razem na wzmacnianym ceowniku giętym na zimno wskazuje na wyraźny wzrost nośności belki wzmacnionej płaskownikiem [1]  $60 \times 1,5-500$  od 7 do 8,5 kN (rys. 27, 28) przy zaobserwowanej pracy skleiny bez utraty nośności jej samej [63].

Głównym ograniczeniem nośności blachownic o smukłych środkach jest podatność tych ostatnich na utratę stateczności miejscowej. Przez doklejenie płyt blaszanych do środków otrzymuje się wyraźne ich wzmocnienie, co w warunkach, gdy inne metody (np. dospawanie) nie mogą być użyte z uwagi np. na konieczność zniszczenia powłoki galwanicznej czy niekorzystny wpływ nagrzania miejscowego, stanowi sprawdzoną alternatywę renowacji konstrukcji blachownicowych [60].



Rys. 27. Belka ceowa z profilu zimnogiętego ze wzmocnieniem [63]

Fig. 27. Test arrangement for a reinforced beam from cold–formed U profile [63]



Rys. 28. Ścieżka równowagi statycznej obciążenie–ugięcie w środku rozpiętości [63]

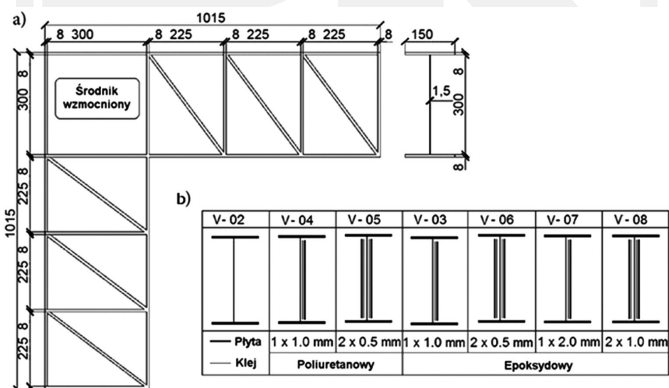
Fig. 28. Path of static equilibrium at midspan [63]

### 6.3. Blachownice i ich wzmocnianie

Głównym ograniczeniem nośności blachownic o smukłych środnikach jest podatność tych ostatnich na utratę stateczności miejscowej. Przez doklejenie płyt blaszanych do środników otrzymuje się wyraźne ich wzmocnienie, co w warunkach, gdy inne metody (np. dopawanie) nie mogą być użyte z uwagi np. na konieczność zniszczenia powłoki galwanicznej czy niekorzystny wpływ nagrzania miejscowego, stanowi sprawdzoną alternatywę renowacji konstrukcji blachownicowych [60].

Jako przykład udanego wykorzystania techniki klejenia w przypadku wzmocniania blachownic mogą służyć: naroże ramy blachownicowej [63] i smukłe środniki dźwigarów skrzynkowych [46].

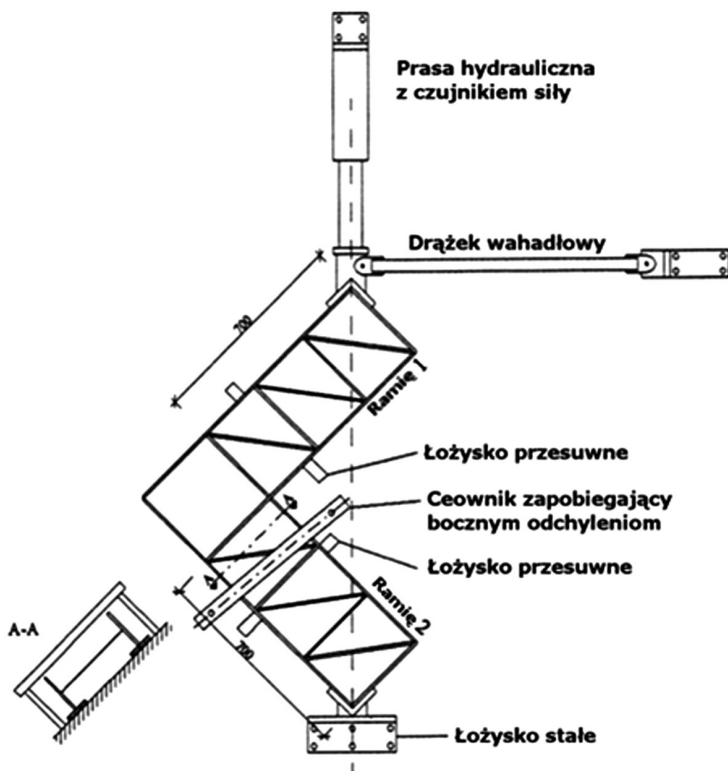
Na rys. 29 przedstawiono geometrię badanego naroża ramy (a) i sposoby jej wzmocnienia różniące się liczbą doklejanych blach i rodzajem kleju (b).



Rys. 29. Geometria naroża wzmocnianego (a) i sposób wzmocnienia (b), [63]

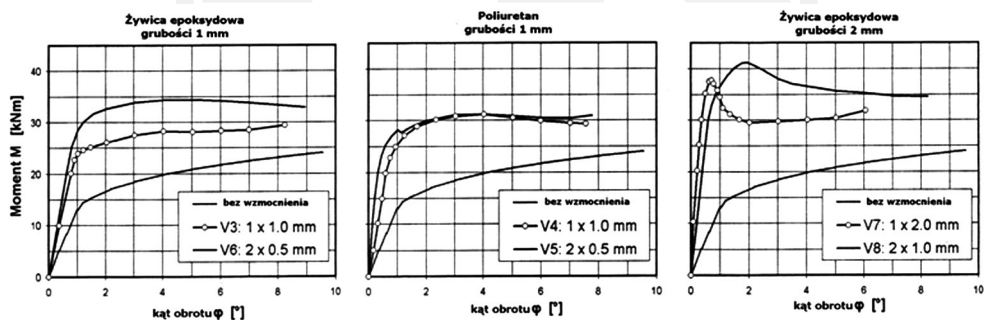
Fig. 29. Geometry (a) and layouts of reinforcements of the knee (b), [63]

Miarą wzmocnienia od 44% do 153% jest w tym przypadku przyrost nośności przy zginaniu osiągniętej na stanowisku badawczym pokazanym na rys. 30 i zilustrowanej dla poszczególnych modeli V-3–V-8 na wykresach  $M-\phi$  (moment zginający – kąt obrotu) rys. 31.



Rys. 30. Schemat obciążenia wzmocnionego naroża ramy w stanowisku badawczym [63]

Fig. 30. Test arrangement for reinforced knee joint [63]

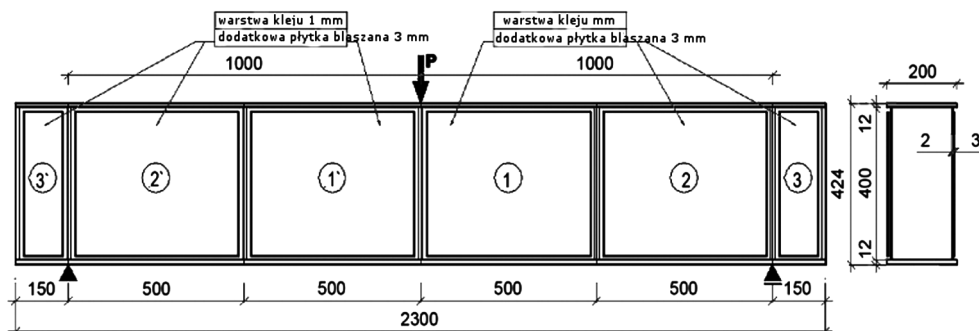


Rys. 31. Zależność moment zginający  $M$  – kąt obrotu  $\phi$  dla naroży ramy [63]

Fig. 31. Moment  $M$  – rotation  $\phi$  curves for knee joint [63]



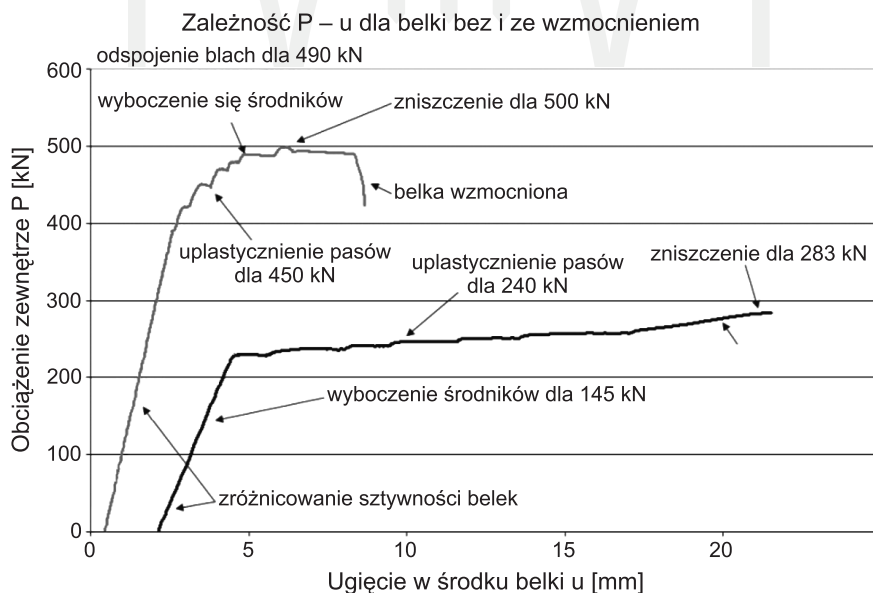
Geometrię i sposób obciążenia skrzynkowej blachownicy ze średnikami grubości 2 mm wzmacnianymi przez doklejenie blach o grubości 3 mm za pomocą dwuskładnikowej żywicy epoksydowej (Korapox 558 – por. tabela 1) o warstwie grubości 1 mm przedstawia rys. 32.



Rys. 32. Wymiary belki skrzynkowej z doklejonymi blachami 3 mm [46]

Fig. 32. Geometry and layouts of reinforcements of the box girder with glued sheets of 3 mm thickness [46]

Na rys. 33 przedstawiono ścieżki równowagi statycznej: obciążenie  $P$  – ugięcie  $u$  dla belki wzmocnionej (por. rys. 32) i belki bez wzmocnienia. Stwierdzono wyraźny przyrost nośności wzmocnionej belki sięgający 60%.



Rys. 33. Ścieżki równowagi statycznej  $P - u$  dla belki skrzynkowej wzmocnionej i bez wzmocnienia

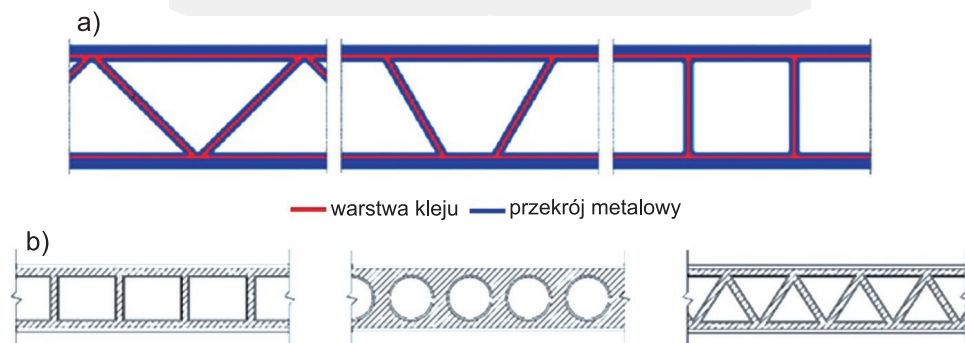
Fig. 33. Comparison of experimental  $P - u$  paths of static equilibrium of the reinforced and not reinforced box girders

Technika klejenia może w przypadku blachownic stanowić także poważną alternatywę dla wykonywania połączeń montażowych. W pracy [47] przedstawiono koncepcję klejonego styku montażowego uniwersalnego ze sposobem jego wymiarowania i weryfikacją numeryczną obliczeń. Rozwinięcie tego pomysłu wymaga jednak dalszych badań doświadczalnych.

#### 6.4. Klejone systemy płyt ażurowych i płyt SPS (stal – polimer – stal)

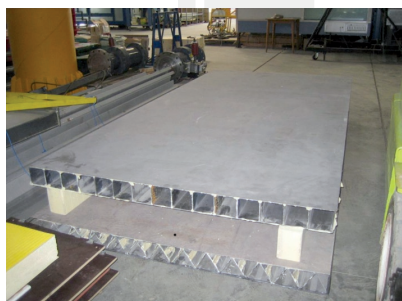
Klejone płyty ażurowe ze stali stanowią alternatywę dla konwencjonalnych spawanych płyt ortotropowych z uwagi na uniknięcie zjawisk zmęczeniowych wywołanych spawaniem i zmniejszeniem wysokości przekroju bez redukcji nośności dzięki możliwości doklejenia blachy od spodu.

Na rys. 34 przedstawiono klejone płyty ażurowe o różnych przekrojach z klejeniem cienkowarstwowym (a) i grubowarstwowym (b) [11]. W badaniach wykazują one wysoką nośność, dużą izotropię i sztywność na skręcanie. Przykłady modeli płyt typu (a) pokazano na rys. 35, a na rys. 36 technologię ich klejenia.



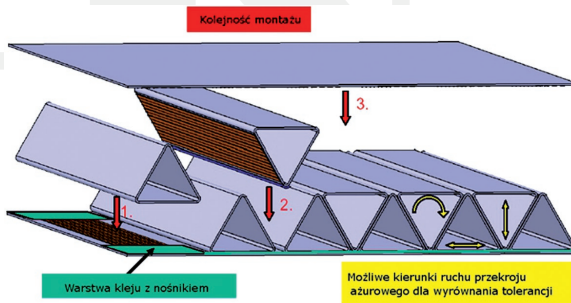
Rys. 34. Klejone płyty ażurowe z klejeniem a) cienkowarstwowym, b) grubowarstwowym [11]

Fig. 34. Different cross – sections of hollow plates with thin (a) and thick (b) layers [11]



Rys. 35. Modele klejonych płyt ażurowych cienkowarstwowych [11]

Fig. 35. Models of glued thin hollow plates [11]

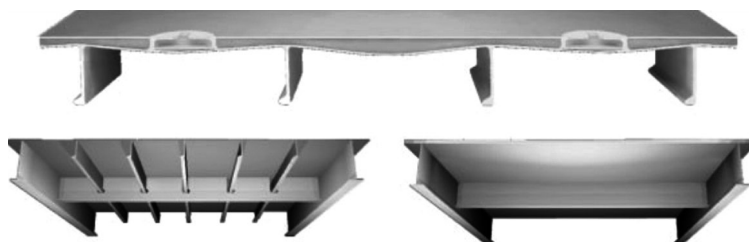


Rys. 36. Technologie klejenia płyt ażurowych [11]

Fig. 36. Technology of gluing for hollow plates [11]

Płyty SPS produkowane są w technologii sandwichowej z podwójną blachą i wypełnieniem z wieloskładnikowego elastomeru łączącego się adhezyjnie z powierzchnią stalową. Technologia ta zaczerpnięta z budownictwa okrętowego jest rozwijana dla potrzeb budownictwa mostowego na Uniwersytecie Technicznym w Aachen [11].

Na rys. 37, u góry przedstawiono przykład płyty SPS z budownictwa okrętowego, poniżej zaś po lewej stronie rozwiązanie tradycyjne płyty uźebrowanej, a po prawej jej klejonej alternatywy, proponowane do wykorzystania w mostownictwie.



Rys. 37. Przykłady wykorzystania płyt SPS w budownictwie okrętowym (u góry) i mostowym (u dołu) po lewej – rozwiązanie konwencjonalne, po prawej – klejone [11]

Fig. 37. Examples for the use of SPS – structures out of ships building (above) and out of the bridge design (below, at left – conventional solution) [11]

## 7. Wnioski

W podsumowaniu należy wymienić zalety połączeń klejonych, a także wskazać na istniejące w konstrukcjach metalowych ograniczenia ich stosowania.

Do cech korzystnych połączeń klejonych zaliczyć można:

- równomierny rozkład naprężeń w złączu,
- przenoszenie obciążeń poprzez całą łączoną powierzchnię,
- nie występowanie naprężeń termicznych,
- możliwość łączenia ze sobą w sposób bezpośredni różnych metali, a także metalu z niemetalem,
- zabezpieczenie powierzchni łączonych przed korozją bimetaliczną i środowiskową,
- nie naruszanie struktury łączonych elementów,
- zwiększenie sztywności połączeń,
- lekkość połączenia w porównaniu z innymi rodzajami połączeń.

Ograniczenia stosowania połączeń klejonych wynikają głównie z umiarkowanej ich odporności na wysoką temperaturę (ok. 250°C), zmian cech wytrzymałościowych skutkiem starzenia, konieczności stosowania w większości przypadków intensywnych zabiegów przygotowawczych, szczególnej dbałości o zachowanie ostrych wymagań technologicznych, ograniczonej możliwości wykorzystania badań nieniszczących do ich kontroli.

Mimo powyższych ograniczeń, jak to pokazano szczególnie w rozdziale 5, klejenie staje się poważną alternatywą dla klasycznych sposobów wykonywania połączeń w konstrukcjach metalowych, a więc polegających na użyciu łączników typu trzpieniowego czy zastosowaniu spawania.

## Literatura

- [1] Clarke J.L. (ed.), *Structural Design of Polymer Composites – EUROCOMP Design Code and Handbook*, First Edition, Halcrow Polymeric Ltd., Great Britain, 1996.
- [2] C w y l M., *Klejone połączenia szklanych elementów elewacji z metalowym szkieletem*, Praca doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa 2007.
- [3] Czarnomska M., *Wpływ starzenia na nośność klejonych połączeń konstrukcji metalowych*, Praca doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa 1987.
- [4] Davis M., Bond D., *Principles and Practices of Adhesive Bonded Structural Joints and Repairs*, International Journal of Adhesion and Adhesives 19, 1999, 91-105.
- [5] de Brugne N.A., *The Strength of Glued Joints*, *Aircraft Engineering*, 16, 1944, 115-118.
- [6] Deutsches Institut für Bautechnik: *Zulassungsbescheid Nr. Z-14.1 – 4 für Verbindungselemente zur Verbindung von Bauteilen im Metalleichtbau*, September 2005 (IFBS – Info 7.01).
- [7] Dilger K., Feldman M., Geiß P.L., Pasternak H., Ummenhofer T. i inni, *Forschung für die Praxis P654*, Neue Konstruktionen durch Einsatz von Klebverbindungen im Stahlbau, FOSTA, Düsseldorf 2008.
- [8] Dillard D.A., *Advances in Structural Adhesive Bonding*, Woodhead Publishing Limited, Oxford, Cambridge, New Delhi, 2010.
- [9] DIN EN 26922 Klebstoffe, Bestimmung der Zugfestigkeit von Stumpfklebungen, Mai 1993.
- [10] DIN EN ISO/DIS 11003-2 Klebstoffe, Bestimmung des Scherverhaltens von Strukturklebstoffen, Teil 2., Scherprüfverfahren für dicke Fügebauteile. Dezember 2001.
- [11] Feldman M., Völling B., Geßler A., Wellershoff F., Geiß P., Wagner A., *Kleben im Stahlbau*, Stahlbau 75, 2006, Heft 10, 834-846.
- [12] Godzimirski J., *Analiza wpływu grubości skleiny na wartość naprężeń dopuszczalnych kleju*, Biuletyn WAT 354, 1982, 2.
- [13] Godzimirski J., *Ocena przydatności próby na ścinanie do porównywania właściwości wytrzymałościowych klejów do metali*, Polimery 28, 1983, 7.
- [14] Godzimirski J., *Praca połączeń klejowych na ścinanie w zakresie plastycznych odkształceń elementów klejonych*, Biuletyn WAT 373, 1983, 9.
- [15] Godzimirski J., *Określenie naprężeń w spoinach klejowych metodą elementów skończonych*, Biuletyn WAT 399, 1985, 1.
- [16] Godzimirski J., *Analiza rozkładu naprężeń w spoinie klejowej połączenia zakładkowego w zakresie odkształceń plastycznych*, Mechanika Teoretyczna i Stosowana 26, 1988, 3.
- [17] Godzimirski J., *Analiza wytrzymałości połączeń klejowych elementów metalowych obciążonych statycznie*, Biuletyn WAT 1813/88.
- [18] Godzimirski J., *Wpływ nieliniowej charakterystyki kleju na naprężenia styczne połączenia klejowego*, Biuletyn WAT 427, 1988, 3.
- [19] Godzimirski J., *Wpływ ukosowania krawędzi elementów klejonych na wytrzymałość połączeń zakładkowych*, Biuletyn WAT 473-474, 1992, 1-2.
- [20] Godzimirski J., *Wpływ czynników konstrukcyjnych i technologicznych na wytrzymałość połączeń klejowych*, Przegląd Mechaniczny, 7, 1993.

- [21] Godzimirski J., Kotlarz W., *Dobór modelu siatki elementów skończonych do obliczeń połączenia klejowego pakietem programów System WAT-KM*, Biuletyn WAT 494, 1993, 10.
- [22] Godzimirski J., *Konstrukcyjne możliwości zwiększania wytrzymałości połączeń klejowych*, Technologia i Automatykacja Montażu, 4, 1996.
- [23] Godzimirski J., Kozakiewicz J., Łunarski J., Zielecki W., *Konstrukcyjne połączenia klejowe elementów metalowych w budowie maszyn*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1997.
- [24] Godzimirski J., Tkaczuk S., *Ocena metody oznaczania wytrzymałości na ścinanie klejów do metali (PN-69/C-89300)*, Biuletyn WAT 538, 1997, 6.
- [25] Godzimirski J., Tkaczuk S., *Ocena przydatności metod numerycznych do obliczania wytrzymałości doraźnej połączeń klejowych*, Biuletyn WAT 553, 1998, 9.
- [26] Godzimirski J., *Wytrzymałość doraźna konstrukcyjnych połączeń klejowych*, WNT, Warszawa 2002.
- [27] Godzimirski J., Tkaczuk S., *Określenie właściwości mechanicznych spoin klejowych*, Technologia i Automatykacja Montażu, 2004, 3-4.
- [28] Godzimirski J., Tkaczuk S., *Numeryczne modelowanie spoin klejowych połączeń obciążonych na ścinanie*, Biuletyn WAT, 4/2005, 2005.
- [29] Godzimirski J., Komorek A., *Badania trwałości zmęczeniowej tworzyw i połączeń adhezyjnych*, Czasopismo Techniczne 6-M/2006, Wydawnictwo PK, Kraków 2006, 201-206.
- [30] Godzimirski J., Rośkowicz M., *Pełzanie tworzyw i połączeń adhezyjnych*, Czasopismo Techniczne 6-M/2006, Wydawnictwo PK, Kraków 2006, 207-214.
- [31] Goland M., Reissner E., *The Stresses in Cemented Joints*, Journal of Applied Mechanics 11, A17-A27, 1944.
- [32] Guideline for European Technical Approval for Structural Sealant Glazing Systems (SSGS): Part 1; *Supported and Unsupported Systems*, November 1999.
- [33] Habenicht G., *Kleben. Grundlagen. Technologien. Anwendung*, Springer Verlag, Berlin 2002.
- [34] Hagl A., *How to Join Steel and Glass. Complex Adhesive Behaviour*, Eurosteel 2008, Graz, Austria, 929-946.
- [35] Hart-Smith L.J., *Adhesive – Bounded Scarf and Stepped Lap – Joints*, Technical Report No CR-112237, NASA, Langley Research Center, 1973.
- [36] Hart-Smith L.J., *Adhesive Bounded Double – Lap Joints*, NASA No CR-112235, 1973.
- [37] Hop T., *Konstrukcje warstwowe*, Arkady, Warszawa 1980.
- [38] Kleje Roine (<http://kleje.roine.pl>).
- [39] Loxit (<http://loxit.pl>).
- [40] Kleje Loxeal (<http://www.kleje-loxeal.pl>).
- [41] Proxima NRT (<http://www.ntr.com.pl>).
- [42] Jaskow M., Rybak M., *Pierwszy most klejony w Polsce*, Drogownictwo, 5, 1965.
- [43] Kajfasz S., *Concrete Beams with Reinforcement Bonded by Glueing, Preliminary Investigations*, RILEM, Paris 1967.
- [44] Kim H., Kedward K., U. S. Department of Transportation. Federal Aviation Administration: *Stress Analysis of In-Plane, Shear Loaded, Adhesively Bonded Composite Joints and Assemblies, Final Report DOT/FAA/AR-01/7*, April 2001.

- [45] Król P.A., *Analiza nośności i odkształcalności zakładkowych połączeń klejonych, śrubowych i klejowo-śrubowych w konstrukcjach z blach cienkich*, Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa 2007.
- [46] Kubieniec G., *Nośność blachownic stalowych wzmacnianych z zastosowaniem klejenia*, Praca doktorska, Politechnika Krakowska, 2008.
- [47] Kubieniec G., Piekarczyk M., *Klejony styk montażowy*, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Budownictwo i inżynieria środowiska z.50, 2008, 165-174.
- [48] Kubieniec G., Piekarczyk M., *Thin-Walled Steel Griders Reinforced with Use of Adhesives – Experimental and Numerical Investigation*, Eurosteel 2008 Conference, 3<sup>rd</sup> to 5<sup>th</sup> September 2008, Graz, Austria, 1611-1616.
- [49] Kuś S., *Belki betonowe ze zbrojeniem zewnętrznym współpracującym przez przyklejenie*, Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZiTB, Krynica 1967.
- [50] Kwiecień A., *Polymer flexible joint – an innovative repair system protecting cracked masonries against stress concentrations*, Proceedings of PROHITECH 09, Protection of Historical Buildings, ed. Mazzolani, 2009 Taylor&Francis Group, London, 1033-1038.
- [51] Łagoda M., *Wzmacnianie mostów przez doklejanie elementów*, Monografia 322, Politechnika Krakowska, Kraków 2005.
- [52] Machalicka K., Eliasova M., *Glued Connection in Glass Structures Influence of Different Factors to Shear Load Carrying – capacity*, Eurosteel 2011, Budapest, Hungary, 387-392.
- [53] Megachemie (<http://www.megachemie.com>).
- [54] Meinz J., *Kleben im Stahlbau, Betrachtungen zum Trag- und Verformungsverhalten und zum Nachweis geklebter Trapezprofilanschlüsse und verstärkter Hohlprofile in Pfosten-Riegel-Fassaden*, Weißensee Verlag, 2010 (Dissertation, BTU Cottbus).
- [55] Merkblatt 382: *Kleben von Stahl und Edelstahl Rostfrei*, Stahl – Informations – Zentrum 1998.
- [56] Pancewicz Z., Kleśta L., *Badania współczynników sprężystości podłużnej i poprzecznej skleiny*, XXIV Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Gdańsk–Krynica 1978.
- [57] Pancewicz Z., Nurek W., *Wybrane zagadnienia projektowania klejonych złączy elementów metalowych*, Archiwum Inżynierii Łądowej, Tom XXII, 2.1/1976, 165-173.
- [58] Pasternak M., Ciupak J., *Eurocode – Based Design Rules for Adhesive Bonded Joints*, 6<sup>th</sup> European Conference on Steel and Composite Structures, August 31 – September 2, 2011, Budapest, 717-722.
- [59] Pasternak M., Kubieniec G., Piekarczyk M., *Adhesives in Strengthening of Steel Structures*, Engineering Structures and Technologies, 2 (2), 2010, 45-50.
- [60] Pasternak M., Kubieniec G., Piekarczyk M., *Adhesives in Strengthening of Steel Structures*, Proceedings of PROHITECH 09, Protection of Historical Buildings, ed. Mazzolani, Taylor&Francis Group, London 2009, 551-556.
- [61] Pasternak M., Meinz J., *Kleben im Stahlbau – zwei Beispiele aus dem Fassadenbau*, Bauingenieur, Band 82, März 2007, 115-124.
- [62] Pasternak M., Meinz J., *Versuche zu gelebten Verstärkungen im Stahlhochbau*, Bauingenieur, Band 81, Mai 2006, 212-217.

- [63] Pasternak M., Schwarzos A., Schimmach N., *The Application of Adhesives to Connect Steel Members*, Journal of Constructional, Steel Research 60, 2004, 649-658.
- [64] PN-69/C-89300 Kleje do metali, oznaczenie wytrzymałości na ścinanie.
- [65] PN-81/C-89034 Tworzywa sztuczne, Oznaczenie cech wytrzymałościowych przy statycznym rozciąganiu.
- [66] PROXIMA NTR Sp. z o. o.: *Kleje przemysłowe – poradnik*, Materiały informacyjne firmy PROXIMA NTR, 2006.
- [67] Rybak M., *Wybrane zagadnienia połączeń klejonych*, Prace LOBiROT, 1, 1973.
- [68] Szelażowski F., *Badania wytrzymałościowe klejonych połączeń części stalowych*, Archiwum Inżynierii Lądowej, Tom VII 2.4, 1961, 475-482.
- [69] Tsai M.Y., Oplinger D.W., Morton J., *Improved Theoretical Solutions for Adhesive Lap Joints*, Int. J. Solids Structures, Vol. 35, No. 12, 1998, 1163-1185.
- [70] Volkersen O., *Die Niekraftverteilung in Zugbeanspruchten mit Konstanten Laschenquerschnitten*, Luftfahrtforschung 15, 1938, 41-47.
- [71] Ecoll (<http://www.ecoll.pl>).
- [72] Loctite Kleje (<http://www.loctite-kleje.pl>).
- [73] Złote kleje (<http://www.zlotekleje.pl>).
- [74] Zając B., *Doświadczalno-analityczne określenie wyężenia polimerowej skleiny w belkach zespolonych*, Praca doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków 2008.
- [75] Żółtowski W., Cwyl M., Król P.A., *Analysis of Connections Between Glass and Metal Based on Structural Silicone*, IMCS 2006, Rzeszów, Poland, 21–23 June 2006.
- [76] Żółtowski W., Cwyl M., *Badania inżynierskich metod połączeń konstrukcyjnych w nowoczesnych fasadach aluminiowo-szklanych nowoczesnych budynków użyteczności publicznej*, Raport z pracy statutowej nr 504/1082/410/4-2004, Instytut Konstrukcji Budowlanych, Politechnika Warszawska, Warszawa 2004.
- [77] Żółtowski W., Cwyl M., *Badania punktowych połączeń klejonych w konstrukcjach fasad metalowo-szklanych*, Świat szkła 7–8 (99), Warszawa 2006.
- [78] Żółtowski W., Cwyl M., *Metody inżynierskich obliczeń konstrukcji ze stopów aluminiowych na bazie konstrukcji fasad słupowo-ryglowych*, Murator PLUS 16/V/05, Warszawa 2005.
- [79] Żółtowski W., Cwyl M., *Współczesne zagadnienia projektowania dla ścian osłonowych budynków reprezentacyjnych*, Polsko-Ukraińska Międzynarodowa Konferencja Naukowa, Warszawa 2006.
- [80] Żółtowski W., Filipowicz A., Łubiński M., *Wymiarowanie konstrukcji stalowych metodą stanów granicznych*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1981.
- [81] Żółtowski W., Kleśta L., Król P.A., *Badania nośności połączeń klejonośrubowych*, IX International Conference on Metal Structures, Kraków, Poland, 26–30 June 1995, 291-297.
- [82] Żółtowski W., Kwaśniewski L., Cwyl M., *Modelowanie i analiza połączeń punktowych*, Świat szkła 10 (101), Warszawa 2006.