

mgr inż. Katarzyna Ciesielczyk<sup>1)</sup>  
 ORCID: 0000-0001-7233-1659  
 dr hab. inż. Robert Studziński<sup>1)\*</sup>  
 ORCID: 0000-0002-0906-8701

# Ocena połączenia płyt warstwowych z belkami zimnogiętymi na taśmy akrylowe

## *Evaluation of the connection between sandwich panels and cold-formed beams using acrylic tapes*

DOI: 10.15199/33.2024.01.08

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki badań belek zimnogiętych połączonych z płytami warstwowymi za pomocą taśm akrylowych. Ocenie poddane zostały dwa warianty połączenia – ciągłe i odcinkowe. Badania ukierunkowane zostały na określenie zachowania się połączenia i wyznaczenia jego nośności w warunkach laboratoryjnych. Opisano mechanizmy zniszczenia układu belka – taśma – płyta oraz zarejestrowano ścieżki równowagi wybranych punktów kontrolnych określonych na belce i płycie.

**Słowa kluczowe:** płyty warstwowe; belki zimnogięte; taśmy akrylowe; połączenie klejone; badania doświadczalne.

**Abstract.** The article presents the results on cold-formed beams connected to sandwich panels using acrylic tapes. Two variants of connection were evaluated – continuous and sectional. Research was aimed at determining the behavior of such a connection and determining its load bearing capacity in laboratory conditions. The failure mechanisms of the beam-tape-panel system are described and the equilibrium paths of selected control points defined on the beam and the sandwich panel are recorded.

**Keywords:** sandwich panels; cold-formed beams; acrylic tapes, glued connection; laboratory tests.

Płyty warstwowe stosowane są w budownictwie jako elementy obudowy ścian i dachów obiektów. Składają się z dwóch cienkich okładzin stalowych i grubego rdzenia wykonanego z materiału termoizolacyjnego. Wyjątkiem jest przypadek, kiedy mają być zastosowane w obiektach inwentarskich. Z uwagi na niekorzystne warunki środowiskowe panujące w takich obiektach wewnętrzna okładzina wykonywana jest z laminatu. Do podstawowych zadań płyt warstwowych zaliczamy: zapewnienie ochrony przed wpływami atmosferycznymi; utrzymanie odpowiedniego poziomu termoizolacyjności przegród, a także przenoszenie obciążenia zewnętrznego (mechaniczne i termiczne) na konstrukcję wsporczą (układy główne lub konstrukcję drugorzędą).

Zmiany klimatyczne i wynikające z nich ocieplenie klimatu skłaniają przedstawicieli sektora budowlanego do wdrażania rozwiązań skutkujących zmniejszeniem energochłonności. Jest to realizowane w ramach idei budownictwa zrównoważonego [1, 2]. Oryginalne spojrzenie na produkcję zrównowa-

żonych wyrobów budowlanych przedstawiono w artykule [3]. Uwzględnienie w nim efektu usztywnienia belki zimnogiętej przez płytę warstwową umożliwia zredukowanie jej przekroju poprzecznego. Przekłada się to na zmniejszenie zużycia stali, a tym samym na mniejszy ślad węglowy konstrukcji. W takim przypadku, obok wymienionych wcześniej funkcji użytkowych i technicznych płyt warstwowych, dochodzi funkcja tzw. bocznego usztywnienia elementu podpierającego płytę. Przez usztywnienie boczne odnotowujemy zwiększenie nośności elementu ze względu na zwichrzenie i wyboczenie giętne wokół słabszej osi. Badanie efektywności stężenia elementów prętowych płytami warstwowymi prowadzono w wielu ośrodkach naukowych [4, 5, 6]. Stan wiedzy jest na tyle ugruntowany, że w 2014 r. grupa robocza TWG7.9 *Sandwich panels and related structures* przy ECCS opublikowała rekomendacje opisujące, w jaki sposób ocenić stabilizację stalowych elementów konstrukcyjnych przez płyty warstwowe [7]. Badania opisane w literaturze i wycieczne opracowania wydane przez ECCS odnoszą się do sytuacji, w której połączenie między płytą warstwową a belką stalową zapewnione jest przez

łączniki mechaniczne (wkręty samogwintujące). Przedstawione w tym artykule badania dotyczą nośności połączenia belka-płyta, realizowanego za pomocą dwustronnych taśm akrylowych. Jest to więc połączenie klejone. Zaprezentowane w artykule wyniki odniesiono do badań w [8], w których na tym samym stanowisku badawczym i z tych samych elementów (z tej samej partii produkcyjnej) przeprowadzono eksperyment z zastosowaniem łączników mechanicznych do połączenia płyt warstwowych z belkami zimnogiętymi. Proponowane połączenie płyt warstwowych z elementami cienkościennymi nie jest ujęte w PN-EN 14509:2013-12 [9] oraz warunkach technicznych wykonania i odbioru robót budowlanych [10]. Ponadto ze względu na zakres temperatury pracy taśm (-40°C do +230°C) wymagałoby dodatkowej oceny w warunkach podwyższonej temperatury czy pożaru.

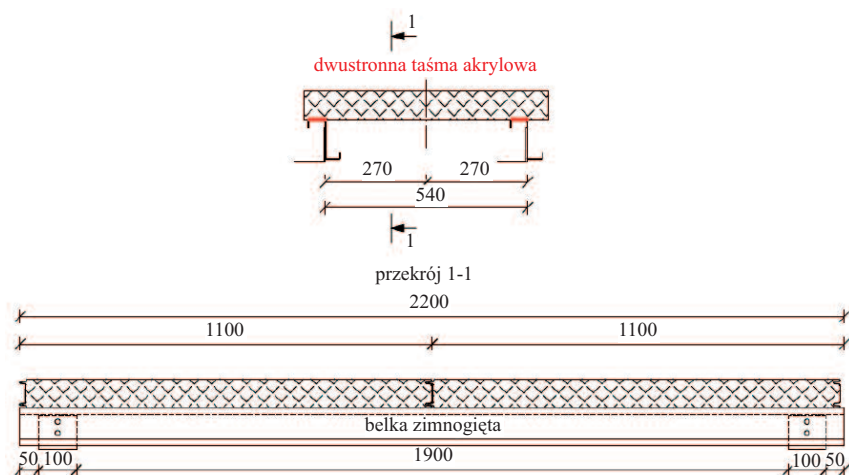
### Opis badania

Na rysunku 1 przedstawiono schemat stanowiska wykorzystanego podczas badań. Badany układ konstrukcyjny składał się z dwóch płyt warstwowych o wymiarach 1,1 x 0,6 m każda, ułożonych na dwóch belkach zimnogiętych o przekroju zetowym. Zetowniki ułożo-

<sup>1)</sup> Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu

<sup>\*</sup> Adres do korespondencji:

robert.studzinski@put.poznan.pl



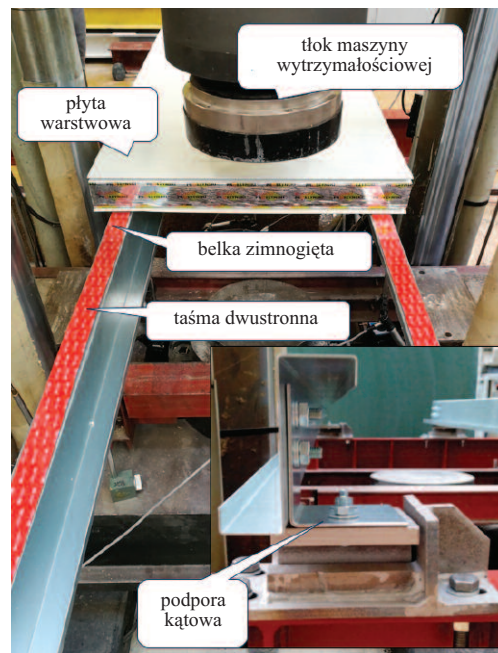
Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego  
Fig. 1. Scheme of the testbed

no w taki sposób, że ich półki były zwrócone w tę samą stronę, czego konsekwencją była asymetria badanego układu. W celu uzyskania symetrycznego obciążenia obu belek przesunięto cały układ względem osi maszyny tak, by środek ciężkości układu pokrywał się z osią przyłożenia obciążenia. Rdzeń płyt warstwowych o grubości 80 mm wykonano z pianki poliizocyanurowej (PIR), a cienkie okładziny zewnętrzne ze stali S280GD. Grubość górnej okładziny wynosiła 0,545 mm, a dolnej 0,491 mm.

Przekrój poprzeczny belki został uformowany w procesie gięcia na zimno z blachy stalowej DX51D+Z275 o nominalnej grubości 1,5 mm. Charakteryzuje się on zagięciem brzegowym na półkach. Wymiary ścianek przekroju w rozwinięciu, mierząc od zagięcia brzegowego półki górnej, można zapisać następująco: 18 mm – 45 mm – 100 mm – 39 mm – 18 mm. W tabeli 1 zamieszczono podstawową charakterystykę geome-

tryczną przekroju belki. Właściwości materiałowe elementów analizowanego układu konstrukcyjnego opisano w [11].

W analizowanym układzie konstrukcyjnym belki zimnogiętej zamocowano do niepodatnej konstrukcji wsporczej za pośrednictwem podpór kątowych wykonanych z blachy o grubości 3 mm. Podpory kątowe zostały przymocowane do łożyska podporowego umożliwiającego obrót belki w głównej płaszczyźnie zginania (oś y-y, przyjmując oznaczenie jak w EC). Belka połączona została z płatwią za pomocą dwóch śrub M12 kl. 5.6 w układzie pionowym (fotografia 1). Połączenie na śruby wprowadza 10 mm dystans między dolną półką belki a blachą łożyska, co eliminuje możliwość zniszczenia lokalnego belki od reakcji pionowej na podporze. Jest to rozwiązanie systemowe powszechnie stosowane przez producentów płatwi zimnogiętych. Oryginalnym elementem badanego układu konstruk-



Fot. 1. Stanowisko badawcze i widok podparcia belki

Photo 1. Testbed and beam support view

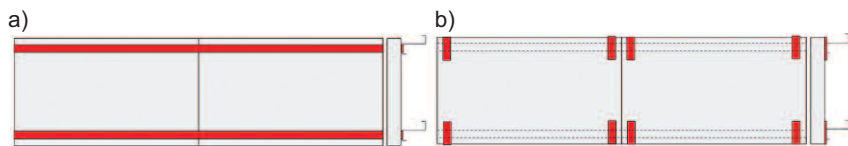
cyjnego jest zastosowanie dwustronnych taśm akrylowych do łączenia belki zimnogiętej z płytą warstwową. Wykorzystane w badaniach taśmy 3M VHB 5952 [12] przeznaczone są do łączenia elementów stalowych, a także tworzyw sztucznych. Taśma składa się z elastycznej pianki akrylowej o grubości 1,1 mm, która pokryta jest z obu stron klejem akrylowym. Zastosowano taśmę o szerokości 38 mm. Zgodnie z kartą produktu [10] deklarowana wytrzymałość na obciążenie rozciągające prostopadłe do płaszczyzny styku i obciążenie styczne wynosi odpowiednio 480,0 i 550,0 kPa. Taśmy zachowują swoje właściwości mechaniczne w temperaturze od -40°C do +230°C.

W badaniu analizowano nośność połączenia belki zimnogiętej z płytą warstwową w przypadku dwóch wariantów naklejenia taśm. Pierwszy zakładał ciągłe nałożenie taśmy wzdłuż całej długości elementu belkowego (rysunek 2a), a drugi odcinkowe w miejscach, w których znalazłyby się łączniki mechaniczne (rysunek 2b). W przypadku odcinkowego nałożenia taśmy zastosowano prostopadłe pasma taśmy o wymiarach 135 x 38 mm, aby ułatwić połączenie płyty warstwowej z górną półką belki cienkościennej. Pasma zostały ułożone prostopadłe do osi podłużnej belki, co powo-

Tabela 1. Charakterystyka geometryczna przekroju belki zimnogiętej

Table 1. Geometric propertie of a cold-formed beam cross-section

Wymiary	$a_1$	$b_1$	$h$	$b_2$	$a_2$
	[mm]				
	18,0	45,0	100,0	39,0	18,0
Charakterystyka geometryczna	$A$	$I_y$	$I_z$	$I_x$	$I_{yz}$
	[cm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>4</sup> ]	[cm <sup>4</sup> ]	[cm <sup>4</sup> ]	[cm <sup>4</sup> ]
	3,2	18,6	14,7	0,024	-20,0
	$I_I$	$I_{II}$	$I_w$	$\alpha$	$t$
	[cm <sup>4</sup> ]	[cm <sup>4</sup> ]	[cm <sup>6</sup> ]	[-]	[mm]
	57,9	5,4	259,0	24,9	1,5



Rys. 2. Schematy ułożenia taśmy akrylowej: a) wariant ciągły; b) wariant odcinkowy  
Fig. 2. Layout schemes for acrylic tape: a) continuous variant, b) sectional variant

duje, że taśma akrylowa styka się z górną półką na obszarze 38 x 45 mm. Przed naklejeniem taśmy powierzchnia elementów łączonych została oczyszczona i przetarta roztworem alkoholu izopropylowego oraz wody o stosunku 50 : 50.

W badanym układzie konstrukcyjnym obciążenie zostało przyłożone w środku układu jako liniowe (za pośrednictwem trawersu) wzdłuż szerokości płyty i jednocześnie prostopadłe do osi belki. W takim układzie obciążenia belka zimnogięta pracuje w schemacie trzypunktowego zginania.

### Analiza wyników

Badania przeprowadzono w przypadku statycznego i quasi-cyklicznego wymuszenia siły. Podczas wymuszenia statycznego założono wysuw tłoka maszyny wytrzymałościowej ze stałą prędkością 10 mm/min. Natomiast w przypadku wymuszenia quasi-cyklicznego zaprogramowano 5 cykli obciążenia w następujących przedziałach: 0,1 kN → 1,0 kN; 0,1 kN → 1,5 kN; 0,1 kN → 2,0 kN; 0,1 kN → 3,0 kN; 0,1 kN → 4,0 kN; 0,1 kN → do zniszczenia. Podczas badania rejestrowano przemieszczenia pionowe dolnej półki przekroju poprzecznego znajdującego się w środku rozpiętości belki i ugięcie płyty warstwowej pod linią obciążenia. Przemieszcze-

nie pionowe płyty warstwowej przedstawiono na rysunku 3. Badania wykazały, że w przypadku obu wariantów nałożenia taśm obciążenie quasi-cykliczne (ciągła cienka linia) nie zmniejsza sztywności połączenia i jego nośności w porównaniu z obciążeniem statycznym (cienka przerywana linia). W celu oceny efektywności proponowanego połączenia na taśmy akrylowe otrzymane wyniki porównano ze ścieżką równowagi układu połączonego za pomocą typowych łączników mechanicznych, tzn. czterech wkrętów samowiercących o lokalizacji pokrywającej się z lokalizacją taśm punktowych (rysunek 2b). Na rysunku 3a i fotografii 2b gruba ciągła linia dotyczy wyników badań wcześniejszych [8], w których do połączenia płyty warstwowej z belką

cienkościenną zastosowano łączniki mechaniczne. Porównanie wyników przedstawiono w tabeli 2.

Na fotografii 2 przedstawiono zarejestrowane mechanizmy zniszczenia analizowanych układów. W obu wariantach ułożenia taśmy, zniszczenie nastąpiło przede wszystkim z powodu interakcyjnej utraty stateczności belki zimnogiętej, na którą składa się zwichrzenie belki (widoczna na fotografii giętno-skrętna postać wyboczenia) i lokalna utrata stateczności ścianek ściskanych przekroju (półka górna i środkowa) w środku rozpiętości belki. Mechanizm ten jest prawidłowy w przypadku belki trzypunktowo zginanej. Dodatkowo w strefie podporowej belki w stanie pokrytycznym połączenie między belką i płytą na taśmy ulegało przerwaniu.

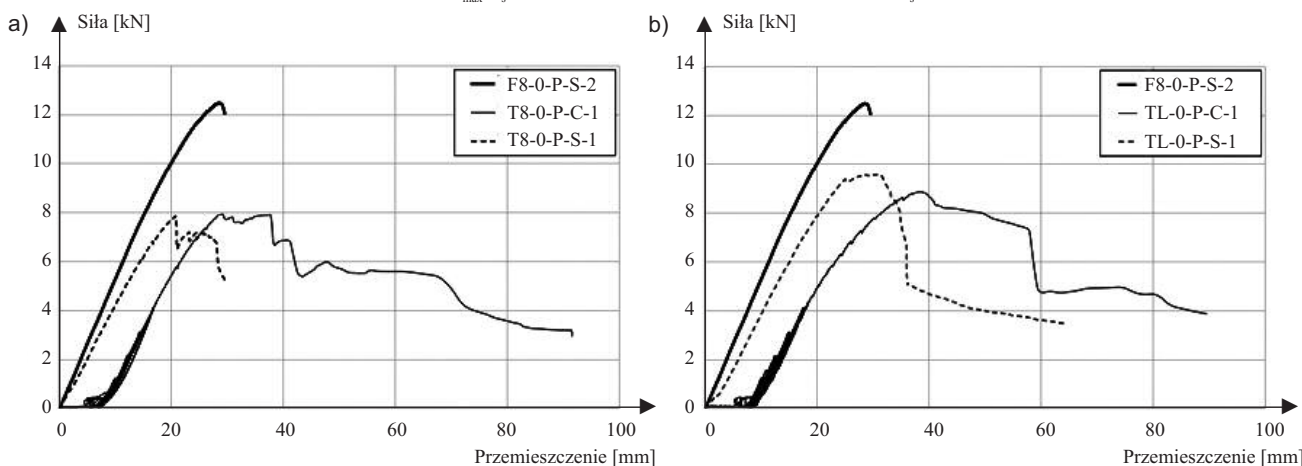
### Podsumowanie

W artykule przedstawiono badania doświadczalne analizujące nośność połączenia płyty warstwowej z belką zimnogiętą za pomocą akrylowych taśm dwustronnych. Otrzymane wyniki porówna-

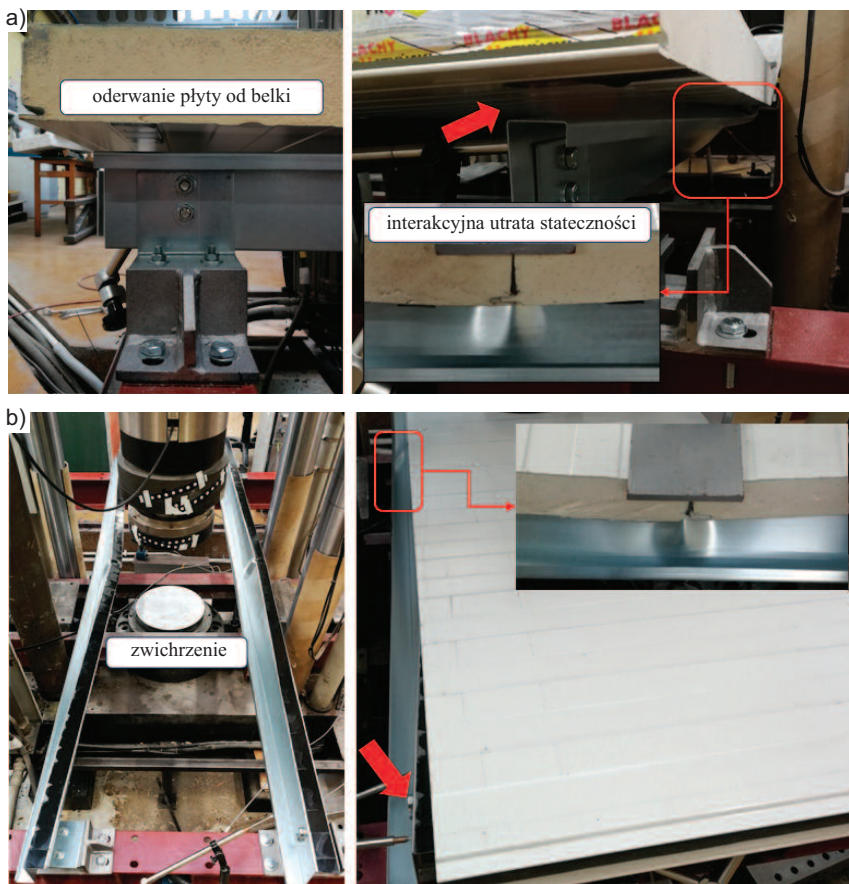
Tabela 2. Wyniki badań; porównawczo dodano wynik dotyczący łączników mechanicznych [8]  
Table 2. Test results; the result of mechanical fasteners [8] was added for reference

Nazwa	$F_{max}$ [kN]	avg. $F_{max}$ [kN]	u(płyta) [mm]	avg. u(płyta) [mm]	u(belka) [mm]	avg. u(belka) [mm]	$k_s$ (płyta) [kN/mm]	$k_s$ (belka) [kN/mm]
F8-0-P-S-1	12,29		34,2		15,1			
F8-0-P-C-1	12,27	12,35	36,3	35,56	15,2	15,33	0,35	0,81
F8-0-P-S-2	12,48		36,2		15,7			
T8-0-P-C-1	7,93	7,89	29,2	29,23	11,0	11,02	0,27	0,72
T8-0-P-S-1	7,85		29,3		11,0			
TL-0-P-C-1	8,87	9,22	38,4	38,87	14,7	12,74	0,24	0,72
TL-0-P-S-1	9,58		39,3		10,8			

Oznaczenia: F8 – łączniki mechaniczne; T8 – taśmy odcinkowe; TL – taśmy ciągłe; S – obciążenie statyczne; C – obciążenie cykliczne; 0 – odnosi się do kąta nachylenia badanego układu względem płaszczyzny maszyny; P – przyjęte obciążenie;  $F_{max}$  – siła niszcząca; u(płyta) – ugięcie płyty przy  $F_{max}$ ; u(belka) – ugięcie belki przy  $F_{max}$ ;  $k_s$  (płyta) – sztywność ścieczna płyty przy zniszczeniu;  $k_s$  (belka) – sztywność ścieczna belki przy zniszczeniu



Rys. 3. Zależność siła-przemieszczenie pionowe płyty warstwowej: a) taśmy nałożone odcinkowo; b) taśmy nałożone liniowo  
Fig. 3. The force-vertical displacement relations of the sandwich panel: a) tapes applied sectionally; b) tapes applied continuously



**Fot. 2. Mechanizmy zniszczenia płyt warstwowych łączonych z belkami cienkościennymi taśmami akrylowymi: a) wariant odcinkowy; b) wariant ciągły**  
 Photo 2. Failure mechanisms of sandwich panels connected to thin-wall beams with acrylic tapes: a) sectional variant; b) continuous variant

no z wynikami połączenia na łączniki mechaniczne (wkrety samowiercące). Porównanie takie jest miarodajne, ponieważ połączenia za pomocą taśm i łączników mechanicznych zostały wykonane na tym samym stanowisku badawczym i z wykorzystaniem materiałów z tej samej partii produkcyjnej. Zgodność materiałowa dotyczy użytych belek zimnogiętych i płyt warstwowych. Szczególnie znaczenie ma to w przypadku płyt warstwowych z rdzeniem z pianki poliizocyanurowej, której właściwości (przyczepność, nośność na ścinanie, nośność na ściskanie) zależą od przygotowania dwóch składników, takich jak izocyjaniany oraz poliole. W procesie nakładania tych dwóch składników dochodzi do reakcji polimeryzacji addycyjnej, której towarzyszy wydzielanie się dwutlenku węgla, które powoduje powstanie procesu spienienia pianki. Stwierdzono, że połączenia na akrylowe taśmy dwustronne charakteryzuje się mniejszą nośnością niż na łączniki. W przypadku taśm nało-

żonych odcinkowo i liniowo nośność połączenia stanowi odpowiednio 64% i 75% nośności połączenia na łączniki. Sztywność sieczna, mierzona jako stosunek siły niszczącej do przemieszczenia przy zniszczeniu, wypada również korzystniej w przypadku połączenia na łączniki mechaniczne. Sztywność sieczna belki zimnogiętej przy połączeniu na taśmy odcinkowe i liniowe wynosi 90% sztywności tej belki przy połączeniu na łączniki. Oznacza to, że poziom stężenia elementu belkowego płytą warstwową był w obu wariantach bardzo zbliżony. Otrzymane wyniki badań dotyczących zastosowania akrylowych taśm dwustronnych jako alternatywnego sposobu łączenia płyt warstwowych i belek zimnogiętych są bardzo obiecujące, ale niezbędna jest ich kontynuacja.

Ze względu na ograniczony zakres stosowania taśm w temperaturze od -40 do +230°C szczególną uwagę należy zwrócić na aspekt pracy połączenia na taśmy akrylowe w warunkach podwyższo-

nej temperatury lub pożaru. W przypadku takich warunków pracy należy przewidzieć odpowiednią formę biernej ochrony przeciwpożarowej. Mimo tego zasadne będą badania połączenia na taśmy akrylowe w warunkach podwyższonej temperatury. Ponadto należy uzupełnić badania o ocenę nośności połączenia na akrylowe taśmy dwustronne w przypadku obciążenia ssania wiatrem (przypadek odrywania płyty warstwowej od belki zimnogiętej).

### Literatura

- [1] Czarnecki L, Deja J, Furtak K, Halicka A, Kapliński O, Kaszyńska M, Kruk M, Kuczyński K, Szczechowiak E, Śliwiński J. Idee kształtujące innowacyjne wyzwania techniki budowlanej. W poszukiwaniu paradygmatu rozwoju budownictwa. Materiały Budowlane. 2017; DOI 10.15199/33.2017.07.09.
- [2] Wałach D. Wpływ składu mieszanek betonowych nowej generacji na ich ślad węglowy. Materiały Budowlane. 2023; DOI 10.15199/33.2023.06.07.
- [3] Czarnecki L. Zrównoważone wyroby budowlane – piękna idea, konieczność cywilizacyjna czy też imperatyw termodynamiczny. Materiały Budowlane. 2022; DOI 10.15199/33.2022.01.09.
- [4] Dürr M. Die Stabilisierung biegedrillknickgefährdeter Träger durch Sandwichelemente und Trapezbleche. PhD dissertation 2008, Karlsruhe.
- [5] Kaepplein S, Misiek T, Ummerhofer T. Aussteifung und Stabilisierung von Bauteilen und Tragwerken durch Sandwich elemente (Bracing and stabilisation by sandwich panels). Der Stahlbau. 2010; DOI: 10.1002/stab. 201001324.
- [6] Georgescu M, Ungureanu V. Stabilisation of continuous Z-purlins by sandwich panels: Full scale experimental approach. Thin-Walled Structures. 2014; DOI 10.1016/j.tws. 2013.09.017.
- [7] European Recommendations on the Stabilization of Steel Structures by Sandwich Panels. ECCS: European Convention for Constructional Steelwork, 2014, N°135, 1st Edition.
- [8] Ciesielczyk K, Studziński R. Experimental investigation of sandwich panels supported by thin-walled beams under various load arrangements and number of connectors. Archives of Civil Engineering. 2022; DOI 10.24425/ace. 2022.143045.
- [9] PN-EN 14509:2013-12 Samonośne izolacyjno-konstrukcyjne płyty warstwowe z dwustronną okładziną metalową – Wyroby fabryczne – Specyfikacje.
- [10] Warunki techniczne wykonania i odbioru robót budowlanych. Lekka obudowa z płyt warstwowych 434/2008, Warszawa, ITB.
- [11] Ciesielczyk K, Studziński R. Influence of type and orientation of thin-walled beams on the interaction effectiveness with sandwich panels. In: Modern Trends in Research on Steel, Aluminium and Composite Structures: Proceedings of the XIV International Conference on Metal Structures (ICMS2021), Poznan, Poland, 2021. pp. 208 – 214; DOI 10.1201/9781003132134-24.
- [12] [https://technicaldatasheets.3m.com/en\\_US?pi=000083](https://technicaldatasheets.3m.com/en_US?pi=000083), access 29.10.2023

Badania zrealizowano w ramach projektu 0412/SBAD/0060 Politechniki Poznańskiej.

Przyjęto do druku: 02.01.2024 r.