

# Ocena wpływu ekstremalnych temperatur utwardzania wyrobów do konstrukcyjnego łączenia materiałów na ich wybrane właściwości użytkowe

Evaluation of the impact of extreme hardening temperatures of products for structural joining of materials on their selected functional properties

dr inż. Damian Wojnowski (ORCID: 0000-0003-2468-012X), mgr inż. Magdalena Bardan (ORCID: 0000-0002-3362-507X), Instytut Techniki Budowlanej

DOI 10.5604/01.3001.0053.8493

**Streszczenie:** Celem eksperymentu była ocena wpływu temperatury utwardzania na wybrane właściwości użytkowe wyrobów do łączy konstrukcyjnych. Do badań wytypowano trzy kleje epoksydowe przeznaczone – w ramach naprawy konstrukcji betonowych – do przyklejania materiałów, takich jak np. maty z włókien węglowych, szklanych i aramidowych. Substraty, z których składają się poszczególne kleje, jak również przygotowane obiekty badawcze, kondycjonowano w warunkach laboratoryjnych oraz ekstremalnych temperaturach utwardzania, wytypowanych do projektu w oparciu o informacje znajdujących się w kartach technicznych wyrobów. Jako temperatury ekstremalne przyjęto maksymalną 35°C i minimalną 10°C wartość deklarowaną wspólną dla wytypowanych klejów. Przeprowadzono badania, których wyniki stanowią podstawowe kryterium oceny jakości połączeń klejowych, takie jak: wytrzymałość na ścinanie (przy różnych wartościach kąta nachylenia złącza), wytrzymałość na ściskanie i zginanie. Dodatkowo wykonano badanie przyczepności betonu starego do betonu starego, które pozwoliło określić, jaki wpływ ma temperatura utwardzania na połączenie kleju i betonu. Analiza uzyskanych wyników wykazała wpływ temperatury utwardzania wyrobów do łączy konstrukcyjnych na ich wybrane właściwości użytkowe. Większy wpływ na obniżenie poziomu uzyskanych parametrów ma spadek temperatury utwardzania klejów do łączenia konstrukcyjnego do 10°C.

**Słowa kluczowe:** wyroby do łączenia konstrukcyjnego, przyczepność betonu starego do starego, wytrzymałość na ścinanie, wytrzymałość na zginanie i ściskanie.

**Abstract:** The aim of the experiment was to evaluate the influence of the hardening temperature on selected performance properties of products for construction joints. Three epoxy adhesives were selected for the tests, intended – as part of the repair of concrete structures – for gluing materials such as carbon, glass and aramid fiber mats. The substrates, which make up the individual adhesives, as well as the prepared research objects, were conditioned in laboratory conditions and extreme hardening temperatures, selected for the project based on the information contained in the technical data sheets of the products. The maximum 35°C and minimum 10°C declared values shared by the selected adhesives were adopted as extreme temperatures. Tests were carried out, the results of which constitute the basic criterion for assessing the quality of adhesive joints, such as: shear strength (at different values of the angle of inclination of the joint), compressive and bending strength. In addition, the adhesion test of the old concrete to the old concrete was performed, which allowed to determine the influence of the hardening temperature on the bonding of the adhesive and concrete. The analysis of the obtained results showed the influence of the hardening temperature of products for construction joints on their selected performance properties. The decrease in the curing temperature of structural adhesives to 10°C has a greater impact on the reduction of the obtained parameters.

**Keywords:** products for structural bonding, adhesion of hardened concrete to hardened concrete, shear strength, flexural and compressive strength.

## 1. Wprowadzenie

Wyroby do konstrukcyjnego łączenia materiałów stosowane są do wykonywania wzmocnień zarówno w nowo wznoszonych, jak i już istniejących obiektach. Służą do przyklejania zewnętrznych płyt zarówno ze stali, jak i innych materiałów o zróżnicowanych właściwościach fizykomechanicznych. Wyroby te wykorzystywane są również do wykonywania połączeń

między elementami stwardniałego betonu, gdzie znajdują zastosowanie przy naprawach i wzmacnianiu elementów prefabrykowanych. Można je także stosować przy układaniu mieszanki betonowej na stwardniałym betonie jako złącze adhezyjne [1, 2, 3]. W dostępnej literaturze znajduje się wiele publikacji mówiących o wykorzystaniu klejów epoksydowych jako wyrobów do łączy konstrukcyjnych w powyższych zastosowaniach [4, 5, 6]. Otrzymanie oczekiwanego połączenia

**Tabela 1.** Wybrane właściwości identyfikacyjne i użytkowe oraz zakres temperatury utwardzania badanych wyrobów

Lp.	Właściwości	Wyrób I	Wyrób II	Wyrób III	
1	Wygląd/konsystencja	Składnik A – biały, o konsystencji gęstej pasty z widocznymi ziarnami wypełnienia Składnik B – ciemnoszary, o konsystencji gęsto-płynnej	Składnik A-przezroczysty, bezbarwny, o konsystencji lepkiej cieczy Składnik B – przezroczysty, jasnożółty, o konsystencji wody	Składnik A – przezroczysty, bezbarwny, o konsystencji lepkiej cieczy Składnik B – przezroczysty, jasnożółty, o konsystencji wody Składnik F – biały proszek bez zbryleń	
2	Gęstość [g/cm <sup>3</sup> ]	Składnik A – 1,51 Składnik B – 1,58	Składnik A – 1,17 Składnik B – 0,98	Składnik A – 1,17 Składnik B – 0,98 Składnik F – 2,8-3,2	
3	Proporcje mieszania składników wyrobów	Składnik A	10,3	4,2	4,2
		Składnik B	4,7	1,8	1,8
		Składnik F	-	-	4,0
4	Temperatura otoczenia/podłoża [°C]	8–35	10–35	10–35	
5	Skurcz [%]	0,01	0,02	0,01	
6	Moduł sprężystości przy ścisnaniu [MPa]	≥7100	≥3200	≥6500	

klejowego pod względem wytrzymałości wymaga uwzględnienia zarówno czynników materiałowych (rodzaju oraz właściwości kleju), technologicznych (przygotowanie powierzchni materiałów przeznaczonych do klejenia, sposób przygotowania i nakładania kleju, warunki utwardzania), konstrukcyjnych, jak i czynników związanych z eksploatacją połączenia [7]. Ze względu na zmienne warunki termiczne, panujące w ciągu roku w Polsce, istotnym problem dla projektantów, techników i wykonawców staje się ich wpływ na jakość prowadzonych prac budowlanych. Dlatego w projekcie badawczym skupiono się na analizie wpływu czynnika technologicznego, jakim są podwyższona oraz obniżona temperatura utwardzania klejów epoksydowych do łączy konstrukcyjnych, na ich wybrane właściwości użytkowe. Temperatura podczas procesu utwardzania odgrywa ważną rolę w szybkości utwardzania, ponieważ ciepło zapewnia więcej energii do reakcji. Oznacza to, że proces utwardzania przebiega szybciej w wysokich temperaturach i wolniej w niskich temperaturach.

## 2. Materiały

Obiekty badań stanowiły trzy wyroby stosowane jako złącze adhezyjne do połączeń konstrukcyjnych. Są to kleje epoksydowe dwu- i trzykomponentowe. Dwa z nich składały się z żywicy i utwardzacza (wyrób I i II), zaś trzeci dodatkowo zawierał wypełniacz mineralny (wyrób III). Wyroby charakteryzowały się zarówno różnymi właściwościami identyfikacyjnymi, jak i użytkowymi. Zestawienie wybranych właściwości identyfikacyjnych oraz użytkowych dla zastosowanych do badań klejów epoksydowych przedstawiono w tabeli 1. Odmienne konsystencje składników w poszczególnych wyrobach, a także obecność wypełniacza w jednym z nich istotnie wpływają na możliwości aplikacyjne, a co za tym idzie także na różne możliwości zastosowania poszczególnych wyrobów. Poza różnicami we właściwościach identyfikacyjnych różnią się także poziomami niektórych parametrów użytkowych, a także zakresem

temperatury, w jakiej mogą być stosowane. Składniki poszczególnych wyrobów wymieszano w ściśle określonych proporcjach, doprowadzając do jednorodnej, homogenicznej masy.

## 3. Metody badawcze

Wyroby i systemy do łączenia materiałów z istniejącą konstrukcją objęte są normą PN-EN 1504-4:2006 [3], bez wskazań dotyczących specjalistycznych zastosowań w ekstremalnych warunkach użytkowania [1, 2]. W oparciu o te dane oraz zakresy stosowania wyrobów deklarowane przez producenta przyjęto do badań następujące ekstremalne temperatury utwardzania dla wszystkich wyrobów. Jako minimalną temperaturę, w jakiej mogą być stosowane wszystkie wytypowane wyroby, przyjęto (10±2)°C, natomiast maksymalną – wartość (35±2)°C. Kleje porównawczo poddano także badaniu w warunkach laboratoryjnych (tzn. w temperaturze (21±2)°C i wilgotności (60±10)%.

Wszystkie substraty potrzebne do przygotowania próbek wyrobów były kondycjonowane w wyżej wymienionych temperaturach, tj. (10±2)°C; (21±2)°C; (35±2)°C. Etap mieszania i formowania próbek badawczych przeprowadzano w warunkach laboratoryjnych w temperaturze (21±2)°C oraz wilgotności względnej (60±10)%, w możliwie jak najkrótszym czasie, po czym próbki natychmiast przenoszono do odpowiednich warunków utwardzania tj. (10±2)°C; (21±2)°C; (35±2)°C, gdzie były przechowywane przez 7 dni do czasu rozpoczęcia badań.

W ramach projektu badawczego przeprowadzono badania:

- wytrzymałości na ścisnienie według PN-EN 12190:2000 [8] oraz wytrzymałości na zginanie według PN-EN 196-1:2016-07 [9]. Wytrzymałość na ścisnienie i zginanie jest właściwością określającą parametry użytkowe wyrobu. Badanie przeprowadzono na trzech próbkach dla każdego wariantu badawczego (każdego wyrobu oraz każdej temperatury utwardzania). Probki miały kształt beleczek o wymiarach 40 mm x 40 mm x 160 mm;

**Rys. 1.** Średnie wartości wytrzymałości na ściskanie dla wyrobów I, II i III utwardzonych w temperaturze 10°C, 21°C oraz 35°C

- wytrzymałości na ścinanie według PN-EN 12188:2001 [10].

Wytrzymałość na ścinanie to badanie określające właściwości złącza powstałego przy użyciu kleju. Próbki do badań wytrzymałości na ścinanie przygotowano z wykorzystaniem beleczek stalowych o wymiarach 40 mm x 40 mm x 160 mm przeciętych pod kątem 50°, 60° oraz 70°, tworząc dwie identyczne części. Próbki do badań wykonano, aplikując na każdą płaszczyznę cięcia odpowiadających sobie połówek beleczki, przygotowany wcześniej wyrób, który następnie dociśnięto tworząc złącze o grubości 1–2 mm;

- przyczepności betonu starego do betonu starego według PN-EN 12636:2001 [11].

Przyczepność to badanie określające właściwości złącza powstałego przy użyciu kleju. Próbki do badania przyczepności betonu starego do betonu starego przygotowano przy użyciu beleczek z betonu MC (0,40) według PN-EN 1766:2017-03 o wymiarach 40 mm x 40 mm x 160 mm przeciętych na dwie części, tworząc elementy o wymiarach 40 mm x 40 mm x 80 mm. Próbki do badań wykonano, aplikując na każdą płaszczyznę cięcia odpowiadających sobie połówek beleczki przygotowany wcześniej wyrób, które następnie dociśnięto, tworząc złącze o grubości 1–2 mm.

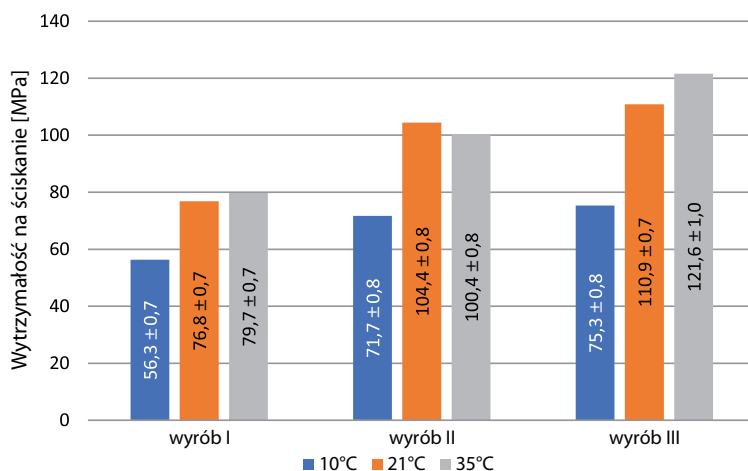
## 4. Wyniki badań

### 4.1. Wytrzymałość na ściskanie

Analizując uzyskane wyniki badań wytrzymałości na ściskanie przedstawione na rysunku 1 zaobserwowano, że użyte do badań kleje epoksydowe wykazały różne zachowanie względem przyjętych temperatur utwardzania. Dwa z trzech badanych klejów (wyrób I i III) wraz ze wzrostem temperatury utwardzania wykazują tendencję wzrostową wartości wytrzymałości na ściskanie. Trzeci z badanych klejów (wyrób II) najwyższą wartość osiąga podczas utwardzania w temperaturze laboratoryjnej. Podniesienie oraz obniżenie temperatury utwardzania powoduje natomiast obniżenie jego wytrzymałości na ściskanie.

W każdym z analizowanych przypadków obniżenie temperatury utwardzania do 10°C skutkowało uzyskaniem niższej wytrzymałości na ściskanie. Porównując wartości, jakie kleje osiągnęły

**Rys. 2.** Średnie wartości wytrzymałości na zginanie dla wyrobów I, II i III utwardzonych w temperaturze 10°C, 21°C oraz 35°C



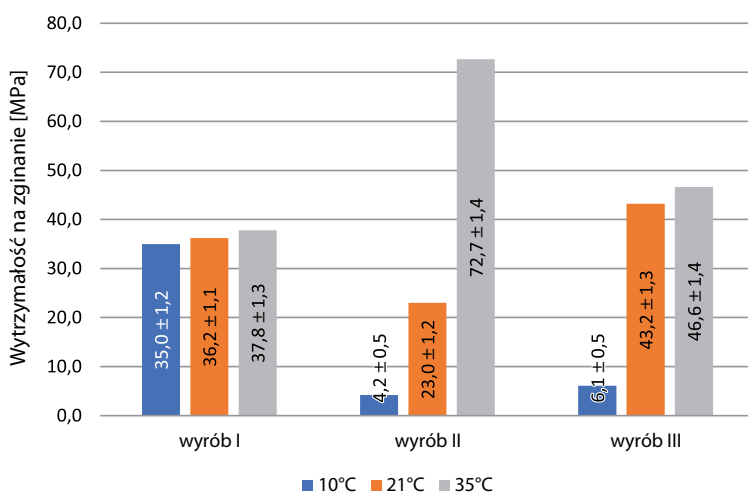
podczas utwardzania w temperaturze obniżonej do tych, jakie uzyskały podczas utwardzania w temperaturze laboratoryjnej, można zauważyć obniżenie wartości od ponad 25% w przypadku wyrobu I, przez ponad 31% w przypadku wyrobu II do ponad 32% w przypadku wyrobu III.

Wzrost temperatury utwardzania do 35°C, co już odnotowano, jedynie w przypadku wyrobu II wpłynął na obniżenie poziomu wartości o 4%. W dwóch pozostałych przypadkach wystąpił wzrost wartości odpowiednio o 4% (wyrób I) i 10% (wyrób III). Można także zaobserwować, że w sytuacji wystąpienia wzrostu wytrzymałości na ściskanie, w efekcie działania podwyższonej temperatury utwardzania, procentowa wartość wzrostu jest zdecydowanie niższa, niż procentowa wartość spadku wywołana obniżeniem temperatury utwardzania.

### 4.2. Wytrzymałość na zginanie

Dla wszystkich badanych klejów odnotowano tendencję wzrostową wytrzymałości na zginanie wraz ze wzrostem temperatury utwardzania. Wpływ zastosowanych w badaniach temperatur utwardzania na uzyskane wartości w każdym z wyrobów znacząco się różni.

W przypadku wyrobu I biorąc pod uwagę małą różnicę zmian wartości, można zauważyć, że zarówno obniżenie, jak i podwyższenie temperatury utwardzania nieznacznie



**Rys. 3.** Średnie wartości wytrzymałości na ścinanie, przy kącie nachylenia płaszczyzny złącza 50°, 60° i 70° dla wyrobu I utwardzanego w temperaturze 10°C, 21°C oraz 35°C

wpływa na otrzymaną wartość względem temperatury laboratoryjnej, a uzyskane wyniki mieszczą się w granicach niepewności. Wyniki badań wraz z niepewnościami pomiaru umieszczono na rysunku 2.

Inną zależność obserwujemy w przypadku wyrobu II. Widoczna jest tu wyraźna różnica w uzyskanych wartościach w zależności od występującej temperatury utwardzania. Obniżenie temperatury utwardzania do 10°C spowodowało obniżenie wartości wytrzymałości na zginanie względem temperatury laboratoryjnej o ponad 80%, zaś jej podwyższenie do 35°C spowodowało wzrost o ponad 215%.

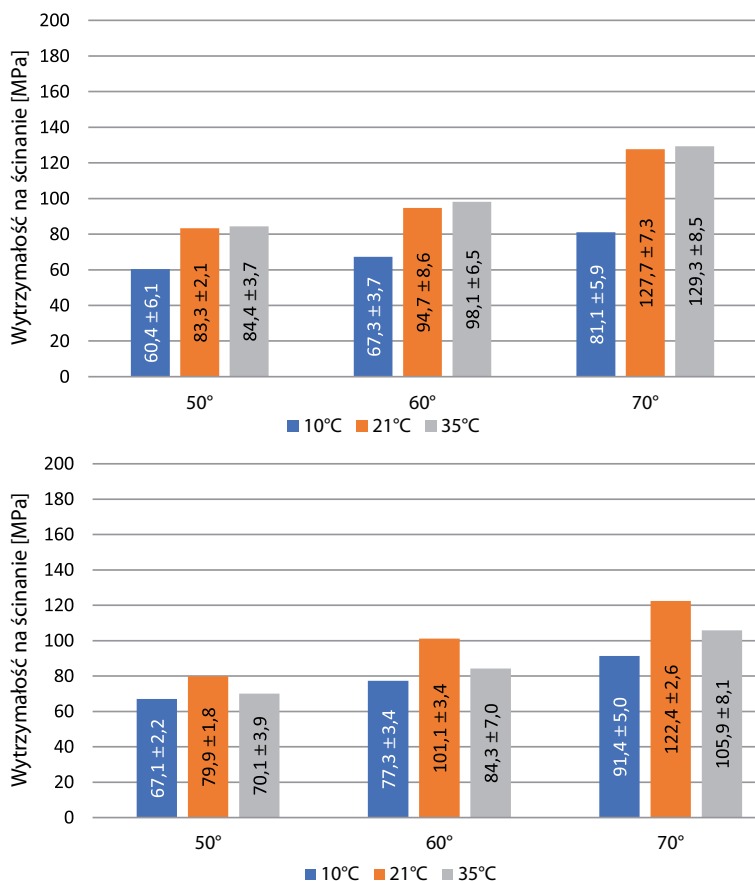
Rezultaty badań wyrobu III pokazały, iż obniżenie temperatury spowodowało obniżenie wartości wytrzymałości na zginanie o ponad 85%, podobnie jak dla wyrobu II. Podwyższenie do 35°C temperatury utwardzania skutkowało wzrostem wytrzymałości na zginanie o niespełna 8%.

### 4.3. Wytrzymałość na ścinanie

Wraz ze zwiększającym się kątem nachylenia wzrasta pole powierzchni płaszczyzny złącza i obserwowany jest wzrost wartości wytrzymałości na ścinanie. Obniżenie temperatury utwardzania klejów epoksydowych do poziomu 10°C powoduje obniżenie wartości wytrzymałości na ścinanie. Zależność tę zaobserwowano dla wszystkich badanych wyrobów, co przedstawiono na rysunkach 3, 4, 5. Największy spadek wartości wytrzymałości, wynoszący blisko 45%, odnotowano dla wyrobu III, w badaniu w płaszczyźnie nachylonej pod kątem 70°. Podwyższenie temperatury utwardzania w przypadku wyrobu II oraz III również skutkuje spadkiem wytrzymałości na ścinanie względem temperatury laboratoryjnej dla wszystkich kątów nachylenia płaszczyzny. Inną zależność obserwujemy dla wyrobu I, gdzie podwyższenie temperatury utwardzania do górnej granicy ich stosowania wpływa w nieznacznym stopniu na wzrost wytrzymałości na ścinanie. We wszystkich powyższych przypadkach otrzymano zniszczenie kohezyjne w kleju.

### 4.4. Przyczepność betonu starego do betonu starego

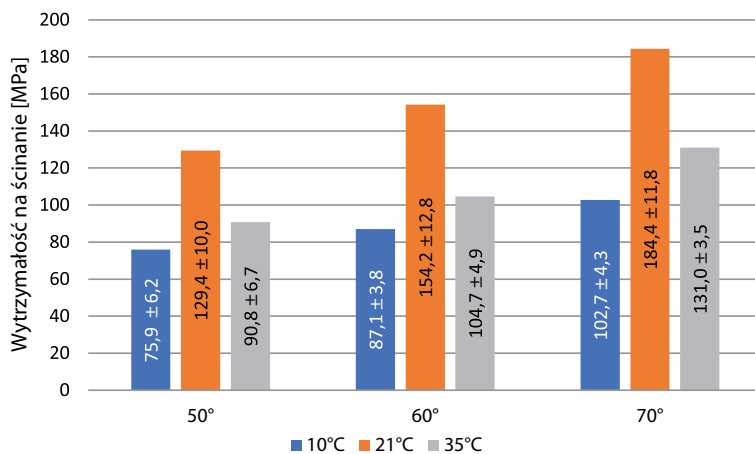
**Rys. 5.** Średnie wartości wytrzymałości na ścinanie przy kącie nachylenia płaszczyzny złącza 50°, 60° i 70° dla wyrobu III utwardzanego w temperaturze 10°C, 21°C oraz 35°C



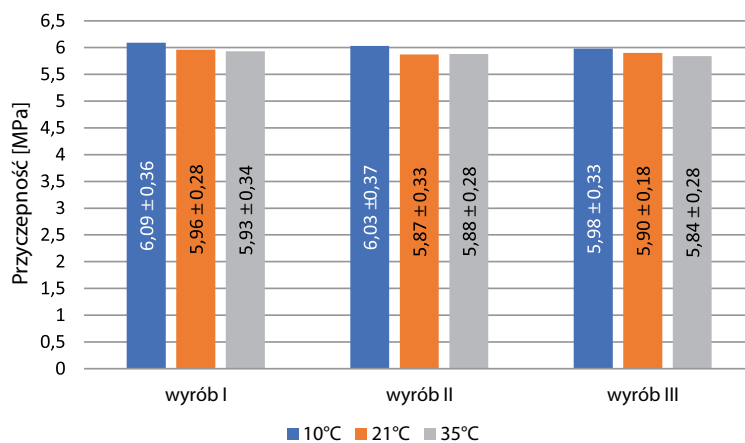
**Rys. 4.** Średnie wartości wytrzymałości na ścinanie przy kącie nachylenia płaszczyzny złącza 50°, 60° i 70° dla wyrobu II utwardzanego w temperaturze 10°C, 21°C oraz 35°C

Ekstremalne temperatury utwardzania klejów epoksydowych do łączenia konstrukcyjnego nie mają wpływu na przyczepność starego betonu do starego betonu. Wszystkie wyroby w każdej z przyjętych temperatur utwardzania uzyskały wartości ok. 6 MPa, przy jednoczesnym zniszczeniu kohezyjnym w belecze z betonem. Wyniki badań wraz z niepewnościami pomiaru przedstawiono na rysunku 6.

Wykonane badania wraz z analizą ich wyników wykazały, że utwardzanie klejów w temperaturach ekstremalnych może wpływać na poziom uzyskanych wartości. Większy wpływ na obniżenie uzyskanych wyników ma spadek temperatury



**Rys. 6.** Średnie wartości przyczepności betonu starego do betonu starego dla wyrobów I, II i III utwardzonych w temperaturze 10°C, 21°C oraz 35°C



utwardzania klejów do łączenia konstrukcyjnego do dolnego zakresu, w jakich mogą być one stosowane (10°C).

Analiza otrzymanych wyników badań przydatna jest dla inżynierów procesu produkcji wyrobów do łączeń konstrukcyjnych, projektantów oraz wykonawców robót budowlanych, które obejmują wzmocnienie lub naprawę konstrukcji betonowych. Obrazuje ona wpływ czynników technologicznych, jakimi są zróżnicowane temperatury utwardzania klejów na ich właściwości wytrzymałościowe. Ze względu na zmienne warunki klimatyczne panujące w Polsce obligatoryjne jest stosowanie się do informacji producenta o minimalnych i maksymalnych temperaturach stosowania znajdujących się w kartach informacyjnych. Podobne wnioski możemy odczytać z publikacji [7], gdzie autorzy podkreślają wpływ warunków wykonywania połączeń klejowych, takich jak temperatura, wilgotność, warunki sezonowania łączonych materiałów na ich wytrzymałość. W publikacji [12] zawarto informacje na temat wyrobów, do ochrony i napraw konstrukcji betonowych, jakimi są zaprawy polimerowo-cementowe, gdzie również poprzez przeprowadzone badania potwierdzono wpływ obniżenia temperatury w początkowym okresie utwardzania na ich wybrane właściwości użytkowe.

## 5. Podsumowanie

Analiza wyników badań pozwala na sformułowanie poniższych wniosków.

- Wzrost temperatury utwardzania epoksydowych wyrobów do łączenia konstrukcyjnego może wpływać zarówno na niewielki spadek (do 4%), jak i wzrost (do 10%) uzyskanych wartości wytrzymałości na ściskanie (względem wartości osiągniętych dla klejów utwardzanych w temperaturze laboratoryjnej).
- Obniżenie temperatury utwardzania epoksydowych klejów do łączenia konstrukcyjnego wpływa w większości przypadków na obniżenie zarówno wartości wytrzymałości na zginanie, jak i ściskanie; w przypadku pierwszego z parametrów spadek wartości przekracza 85% w stosunku do wartości uzyskanej dla kleju utwardzanego w temperaturze laboratoryjnej, zaś w przypadku drugiego przekracza 32%.
- Wzrost temperatury utwardzania klejów epoksydowych nie obniża wartości wytrzymałości na zginanie, a co więcej może powodować znaczący jej wzrost.
- Zwiększenie kąta płaszczyzny ścinania, powodujące zwiększenie pola powierzchni płaszczyzny złącza, wpływa na wzrost otrzymanej wartości wytrzymałości na ścinanie.
- Obniżenie temperatury utwardzania klejów epoksydowych

do 10°C powoduje obniżenie wartości wytrzymałości na ścinanie, jednak osiągnięta wartość uzyskuje poziom pozwalający na spełnienie wymagań przyjętych przez autorów w oparciu o normę [3] i stawianych materiałom klejącym stosowanym do doklejania płyt zbrojonych.

- Wzrost temperatury utwardzania klejów epoksydowych do górnej granicy ich stosowania, tzn. 35°C, może wpłynąć na obniżenie wartości wytrzymałości na ścinanie, jednak uzyskiwana wartość osiąga poziom pozwalający na spełnienie wymagań przyjętych przez autorów w oparciu o normę [3] i stawianych materiałom klejącym stosowanym do doklejania płyt zbrojonych.
- Obniżenie lub podwyższenie temperatury utwardzania klejów epoksydowych przeznaczonych do łączenia konstrukcyjnego nie wpływa na obniżenie przyczepności lub zmianę typu zniszczenia (na inne niż zniszczenie kohezyjne w płaszczyźnie betonu) w ocenie przyczepności starego betonu do starego betonu;

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Czarnecki L., Łukowski P., Garbacz A., Naprawa i ochrona konstrukcji z betonu. Komentarz do PN-EN 1504, PWN, Warszawa, 2017
- [2] Czarnecki L., Emmons P. H., Naprawa i ochrona konstrukcji betonowych, Polski Cement Sp. z o.o., Kraków, 2002
- [3] PN-EN 1504-4:2006: Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych – Definicje, wymagania, sterowanie jakością i ocena zgodności – Część 4: Łączenie konstrukcyjne
- [4] Rudawska A., Chmiel M., Warda T., Miturska I., Wpływ rodzaju kleju na wytrzymałość połączeń klejowych blach ze stali nierdzewnej, Przetwórstwo tworzyw, 2016
- [5] Domińczuk J., Wpływ wybranych czynników konstrukcyjnych i technologicznych na wytrzymałość połączeń klejowych, Postępy Nauki i Techniki, 2011
- [6] Rajczyk P., Rajczyk M., Kleje do połączeń konstrukcyjnych, Inżynier Budownictwa, 2018
- [7] Rudawska A., Wybrane zagadnienia konstytuowania połączeń adhezyjnych jednorodnych i hybrydowych, Monografie – Politechnika Lubelska, Lublin, 2013
- [8] PN-EN 12190:2000: Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych – Metody badań – Oznaczanie wytrzymałości na ściskanie zaprawy naprawczej
- [9] PN-EN 196-1:2016-07: Metody badania cementu – Część 1: Oznaczanie wytrzymałości
- [10] PN-EN 12188:2001 Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych – Metody badań – Oznaczanie połączenia stali ze stalą w celu określenia właściwości konstrukcyjnych materiałów klejących
- [11] PN-EN 12636:2001: Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych – Metody badań – Oznaczanie przyczepności betonu do betonu
- [12] Wojnowski D., Możary T., Wpływ obniżonej temperatury podczas wiązania na właściwości zaprawy o napraw konstrukcji betonowych, Przegląd budowlany, 2016