



ZNACZENIE PODATNOŚCI POŁĄCZENIA NAPRAWCZEGO W KONSTRUKCJACH Z MATERIAŁÓW KRUCHYCH PODDANYCH OBCIĄŻENIOM TERMICZNYM

BOGUSŁAW ZAJĄC, *bz@limba.wil.pk.edu.pl*

Instytut Mechaniki Budowli, Politechnika Krakowska

Streszczenie: W pracy zaprezentowano zagadnienia związane z naprawą uszkodzonych konstrukcji betonowych wraz z proponowaną metodą naprawy i zabezpieczenia przed dalszą degradacją, związaną z użytkowaniem w trudnych warunkach środowiskowych przy oddziaływaniu chemicznym i termicznym. Proponowana metoda naprawy z użyciem złącza podatnego pozwala na zachowanie długoterminowej trwałości elementów wykonanych z materiałów kruchych, poddanych zmiennym warunkom środowiskowym. Praca zawiera wyniki badań laboratoryjnych. Podana została propozycja zabezpieczenia osłabionych powierzchni betonowych o niskiej wytrzymałości. Zaprezentowane zagadnienie ma istotne znaczenie dla opisu pracy betonu w środowisku agresywnym w szerokim zakresie temperatury. Wyniki badań mogą być wykorzystane przy analizie trwałości zarówno elementów betonowych, jak i ich połączeń.

Słowa kluczowe: trwałość, naprawa betonu, przyczyny uszkodzeń, skurcz, praca termiczna, rozszerzalność termiczna.

1. Wstęp

W konstrukcjach nie występuje zwykle jedna przyczyna powstania uszkodzeń, lecz jest to zbiór przyczyn, wynikający z zachowania się obiektu w zmiennych warunkach środowiskowych [1–7]. Oddziaływanie chemiczne oraz termiczne w cyklach dobowych i rocznych powoduje degradację elementów w sposób ciągły (rys. 1). Brak odpowiedniego zabezpieczenia powoduje penetrację agresywnych czynników w głąb elementu, przyspieszając jego uszkodzenie, a tym samym znacząco obniżając jego wytrzymałość. W powierzchniowych naprawach konstrukcji betonowych należy stosować odpowiednio dobrane materiały naprawcze [8], które powinny cechować się kompatybilnością (zwłaszcza mechaniczną) z naprawianym podłożem [9]. W praktyce inżynierskiej, do napraw powierzchniowych słabych podłoży betonowych, stosowane są najczęściej materiały charakteryzujące się znacząco wyższymi wytrzymałościami i modułami sprężystości niż naprawiane elementy. Zwykle stosowane materiały naprawcze (na bazie żywic epoksydowych lub betonów polimerowych) cechują się skurczem, generującym naprężenia ścinające w trakcie wiązania, których nie jest w stanie przenieść słabe podłoże. Dodatkowe naprężenia na styku naprawczym generuje oddziaływanie termiczne, odpowiedzialne za powstanie dużego gradientu temperatury pomiędzy warstwą naprawczą i podłożem betonowym. Takie zjawisko występuje na powierzchni górnej części fundamentów pod słupy energetyczne, powodując znacząco większe odkształcenia liniowe silnie nagrzanego lub oziębionego warstwy naprawczej na powierzchni fundamentu, w porównaniu do betonu fundamentu zagłębionego w gruncie (charakteryzującego się stabilną temperaturą, z uwagi na dużą masę i pojemność cieplną). Wygenerowane w miejscu połączenia bardzo duże naprężenia styczne powodują utratę ciągłości połączenia i odpadnięcie nowowyzkonanej sztywnej warstwy naprawczej (rys. 2). Nieskuteczność tego rodzaju napraw wynika z braku kompatybilności mechanicznej pomiędzy

naprawianym podłożem i materiałami stosowanymi do wykonywania warstw naprawczych (rys 3) i zabezpieczających [10–11].

Oddziaływanie chemiczne generuje także naprężenia wewnętrzne w betonie, odpowiedzialne za powstanie mikropęknięć wewnątrz betonu, przebiegające również przez kruszywo (rys. 4) [12–14].



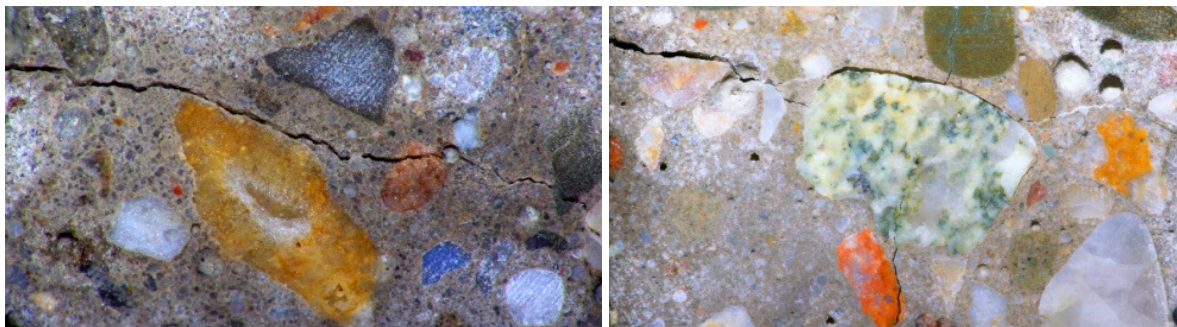
Rys. 1. Przykładowe uszkodzenia konstrukcji betonowych narażonych na oddziaływania chemiczne (karbonatyzacja betonu i korozja stali zbrojeniowej) w zmiennych warunkach środowiskowych



Rys. 2. Górna powierzchnia części fundamentu słupa energetycznego: zdegradowana powierzchnia przed naprawą (po lewej), po naprawie sztywnym betonem polimerowym (w środku) oraz warstwa naprawcza odspojona od podłoża betonowego w wyniku działania temperatury i skurczu (po prawej)



Rys. 3. Rozwarstwienie połączenia pomiędzy betonem nawierzchni lotniskowej a warstwą naprawczą, wykonaną z żywicy epoksydowej z wypełniaczem piaskowym – wynik odkształceń termicznych [6]



Rys. 4. Mikropęknięcia struktury betonu cementowego powstałe po zanurzeniu w siarczanach

Konieczność zapewnienia kompatybilności termo-mechanicznej łączonych materiałów, np. podczas wykonywania powierzchniowych napraw w konstrukcjach betonowych powinna być powszechnie znana w środowisku inżynierskim. Niestety, wiedza ta jest często pomijana w praktyce inżynierskiej, o czym świadczą m. in. zaprezentowane powyżej przykłady. Celem niniejszej pracy jest zwrócenie uwagi na podstawowe zależności, leżące u podstaw kompatybilności termo-mechanicznej łączonych materiałów, które powinny być brane pod uwagę przy wykonywaniu powierzchniowych napraw w betonie. Jako rozwiązanie tego problemu, zostało zaproponowane zastosowanie podatnej warstwy łączącej osłabione podłoże z elementem naprawczym, przy użyciu polimerowego złącza podatnego [10].

2. Współczynnik termiczno-naprężeniowy a kompatybilność mechaniczna materiałów

Współczynnik rozszerzalności liniowej materiału α jest jednym z podstawowych parametrów, uwzględnianych przy badaniu kompatybilności termo-mechanicznej materiałów. Jest on definiowany wzorem (1) i wykorzystywany do wyznaczania współczynnika termiczno-naprężeniowego TN , definiowanego wzorem (2). Współczynnik ten jest wymieniany w branżowych normatywach [15] – tab. 1, ale zwykle niestosowany w praktyce inżynierskiej. Jego wartość nie powinna przekraczać 0,3 MPa/K, co przy zmianie temperatury jedynie o 10 K (°C) daje przyrost naprężeń o 3 MPa. Naprężenie to dwukrotnie przekracza wymaganą minimalną wytrzymałość podłoża betonowego 1,5 MPa w naprawach konstrukcyjnych. Niejednokrotnie, wytrzymałość ta jest nieosiągalna dla zdegradowanych środowiskowo podłoży betonowych. W przypadku zastosowania cienkich warstw naprawczych na grubych podłożach betonowych (fundamenty, nawierzchnie drogowe i lotniskowe) o dużej pojemności cieplnej, osiągnięcie takiej wielkości gradientu temperatury jest łatwe, zwłaszcza w miejscach nasłonecznionych.

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \Delta T} \quad (1)$$

$$TN = E \cdot \alpha \quad (2)$$

gdzie:

α – współczynnik liniowej rozszerzalności, [1/°C];

Δl – zmiana długości próbki, [mm];

l_0 – długość początkowa, [mm];

ΔT – zmiana temperatury, [°C];

E – Moduł Younga, [MPa];

Tabela 1. Wymagania dla zestawów naprawczych (konstrukcyjnych i niekonstrukcyjnych) [15]

Właściwość ^{a)}	Wymagania
Przyczepność do podłoża zestawu naprawczego	$\geq 0,5$ MPa – naprawy mające za zadanie poprawę wyglądu
	$\geq 1,5$ MPa lub zerwanie w podłożu – naprawy konstrukcyjne
Iloczyn $\alpha \cdot E$ (α – wsp. liniowej rozszerzalności cieplnej, E – moduł sprężystości)	$\leq 0,3$ MPa/K

Problemy termiczne, związane z łączeniem słabych podłoży wykonanych z materiałów kruchych ze sztywnymi materiałami wysokiej wytrzymałości, występują m. in. przy wzmacnianiu konstrukcji murowych sztywnymi materiałami kompozytowymi FRP [1, 2, 5]. Obserwowane tam zjawiska są podobne do tych pokazanych na rys. 2 i 3. Wynikają one z różnicy w odkształceniach termicznych łączonych materiałów, generowanych przez odmienne poziomy naprężeń w połączonych warstwach, wywołane silnie zróżnicowanymi poziomami temperatury i sztywności (współczynnik TN). Wygenerowany na styku połączonych materiałów wysoki poziom naprężeń ścinających jest zbyt wysoki do przeniesienia dla słabego (zdegradowanego) podłoża o niewielkiej wytrzymałości.

3. Wyznaczanie współczynników α i TH

W celu zbadania tego zjawiska, wykonane zostały badania laboratoryjne dla różnych materiałów: betonów, żywic epoksydowych i poliuretanów (wykorzystywanych w polimerowych złączach podatnych [10]). Oprócz wartości charakterystycznych modułu Younga (otrzymanych z badań lub danych producenta materiału), wyznaczono wielkości współczynników α , które były określone na próbkach sześciennych o wymiarach 48×48×165 mm dla betonu oraz na walcach o średnicy 28 mm i wysokości 120 mm dla próbek epoksydowych i poliuretanowych. Szczegółowy opis badań przedstawiono w pracy [5]. Badania przeprowadzono w komorze termicznej w zakresie temperatury od około 22 do 60°C, do ustalenia stałych wymiarów, które osiągnęto po czasie od 3 do 6 godzin. W pomiarach wykorzystano czujnik indukcyjny do pomiaru przemieszczeń WA-20 HBM, podłączony do mostka cyfrowego QUANTUM MX840 i komputera gromadzącego dane. Czujnik WA-20 obciążał badany element siłą $F = 1,2$ [N]. Osobny kanał mostka rejestrował temperaturę badanego elementu.

Wartości wyznaczonych parametrów analizowanych materiałów (tab. 2) wskazują, że przy rozważaniu kompatybilności mechanicznej łączonych materiałów pod obciążeniem termicznym, nie wolno brać pod uwagę tylko współczynnika α , ale także musi być uwzględniona cecha sztywności łączonych materiałów (moduł Younga). Wielkość naprężeń ścinających na styku łączonych materiałów, generowanych przez różnicę temperatur, jest zależna od różnicy naprężeń normalnych, obliczanych w każdej warstwie za pomocą współczynnika TN . Na podstawie danych przedstawionych w tab. 2 widać, że żywice epoksydowe nie są kompatybilne termo-mechanicznie z betonem (ich TN jest kilkakrotnie większy od betonu), nawet przy założeniu tej samej wielkości temperatury w łączonych materiałach. Różnica w naprężeniach pomiędzy naprawczą warstwą epoksydową i naprawianym podłożem betonowym ulega istotnemu zwiększeniu, gdy powstaje duży gradient temperaturowy pomiędzy łączonymi materiałami. Przypadki takie były obserwowane w miejscach silnego nasłonecznienia (odsłonięte powierzchnie fundamentów – rys. 2 oraz nawierzchnie lotniskowe – rys. 3), gdzie warstwa naprawcza osiągała temperaturę dochodzącą do 60°C, natomiast naprawiane podłoże

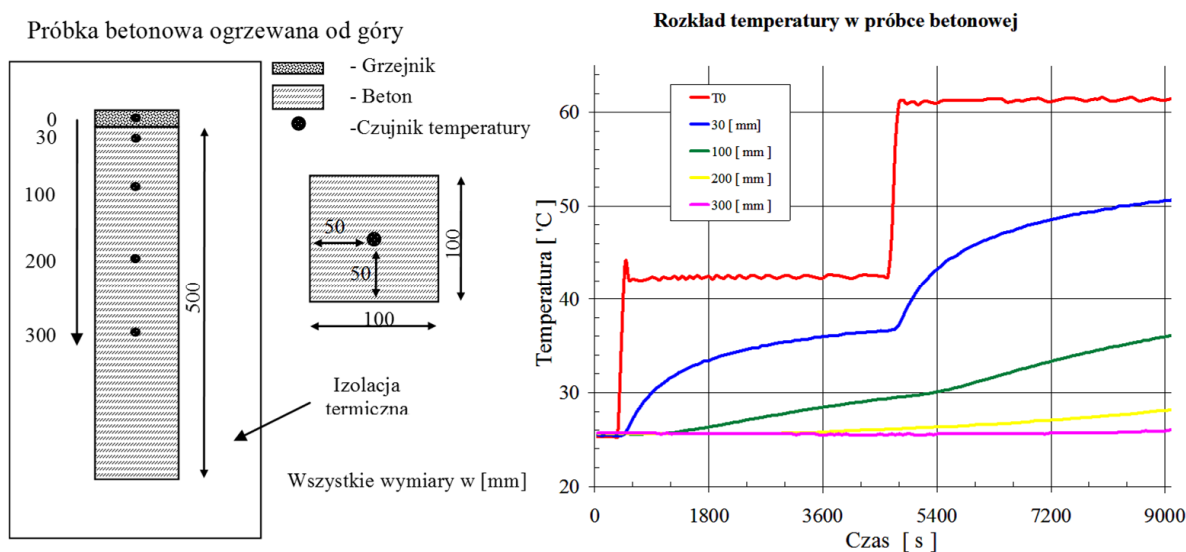
betonowe (o dużej pojemności cieplnej) nie zdążyło się nagrzać powyżej 25°C. Przypadek taki odzwierciedlają wyniki badań własnych pokazane na rys. 5. Próbkę betonową umieszczoną w izolacji termicznej i ogrzewaną od góry przez 1 godzinę ze stałą temperaturą 61°C, na głębokości 3 cm uzyskuje temperaturę nie większą od 51°C, co daje gradient 10°C, natomiast na głębokości 30 cm wynosi ona nie więcej niż 26°C, co daje gradient 35°C. Zakładając, że transfer ciepła pomiędzy warstwą naprawczą i podłożem betonowym jest identyczny jak w badaniu zaprezentowanym na rys. 5, różnica w naprężeniach normalnych (dla gradientu 10°C) wyniosłaby 3,4–5,7 MPa (tab. 2), powodując uszkodzenie słabego podłoża.

Tabela 2. Współczynniki α i TN dla badanych materiałów, wyznaczone w zakresie temperatur 20–60°C (osiąganych w miejscach nasłonecznionych) oraz wartości odkształceń granicznych

Badany materiał	Współczynnik rozszerzalności liniowej α [$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$]	Odkształcalność [%]	Moduł Younga E [MPa]	$TN = E \cdot \alpha$ [MPa/ $^{\circ}\text{C}$]
Beton cementowy – kruszywo otoczkowe	12,3–12,8	Nie badano 0,02–0,1	Nie badano 14000–45000	0,17–0,57
Beton cementowy – kruszywo węglanowe	8–8,2			0,11–0,37
Beton cementowy – kruszywo dolomitowe	9,2–10,3			0,13–0,46
S52 (epoksyd)	108–125	3,8	18000	1,94–2,25
S30 (epoksyd)	30–35	0,22	12800	0,38–0,44
S330 (epoksyd)	82–90	0,9	3800	0,31–0,34
Polimer PM (poliuretan)	152–158	140	4	0,0006
Polimer PS (poliuretan)	151–165	45	8	0,0013
Polimer PT (poliuretan)	126–144	10	600	0,07–0,09

Naprężenia normalne w warstwie materiału naprawy powierzchniowej są wprost proporcjonalne do przyrostu odkształceń liniowych (widoczne po podstawieniu (1) do (2)). Ograniczenie tych odkształceń poprzez sztywne zespolenie warstwy naprawczej i naprawianego słabego podłoża betonowego, generuje w tym ostatnim poziom odkształceń przekraczający odkształcenia graniczne (tab. 2), prowadząc do pęknięcia w podłożu i odspojenia warstwy naprawczej.

Z powyższego względu, dyskusyjne jest stosowanie sztywnych warstw naprawczych o wysokiej wytrzymałości, bezpośrednio zespolonych ze słabym podłożem betonowym. Wymagania podane dla zestawów naprawczych [15] (tab. 1) nie uwzględniają jakości (wytrzymałości) podłoża, dlatego bezkrytyczne stosowanie zaleceń [15] prowadzi do obserwowanej nieskuteczności tego rodzaju napraw, objawiające się delaminacją.



4. Proponowany sposób połączenia słabego podłoża z materiałem naprawczym

Rozwiązaniem tego problemu jest zastosowanie podatnej warstwy szepnej, wykonanej z polimerowego złącza podatnego [10], która jest w stanie pracować w zakresie dużych deformacji, przenosząc równocześnie obciążenia. Przedstawione w tab. 2 parametry dla polimerów PM, PS i PT, stosowanych w złączach podatnych wskazują, że pomimo dużych wielkości współczynników α , cechują się one bardzo niskimi współczynnikami TH , o rząd lub kilka rzędów mniejszymi od tych wyliczonych dla betonów i żywic epoksydowych. Dzięki temu, generowane przez nie wielkości naprężeń termicznych są pomijalne (ich zastosowanie nie spowoduje destrukcji słabego podłoża), a równocześnie są w stanie przenieść odkształcenia o kilka rzędów większe od betonu (tab. 2). Wykonanie z takiego materiału polimerowego podatnej warstwy łączącej słabe podłoże betonowe ze sztywnym materiałem naprawczym wysokiej wytrzymałości, pozwoli na redukcję naprężeń i odkształceń termicznych w tym połączeniu i zapewni ich kompatybilną współpracę w warunkach eksploatacyjnych.

Zaproponowana warstwa szepna oprócz dobrej przyczepności do podłoża i redukcji naprężeń, zapewnia utworzenie dodatkowej szczelnej powłoki, kompatybilnie współpracującej w warunkach działania obciążeń termicznych. Kilku milimetrowa warstwa polimeru stanowi trwałe i skuteczne zabezpieczenie powierzchni betonu przed niszczącym oddziaływaniem agresywnego środowiska oraz chroni elementy zbrojenia przed korozją.

Technologia wykonania takiej warstwy szepnej (rys. 6) polega na:

- Oczyszczeniu podłoża z luźnych i silnie zdegradowanych fragmentów betonu;
- Zagruntowaniu specjalnym primerem poliuretanowym;
- Ułożeniu podatnej warstwy polimeru (np. PS) o odpowiednio zaprojektowanej grubości;
- Pokryciu całej powierzchni polimeru posypką mineralną, która może stanowić końcową warstwę wykańczającą lub podłoże pod ułożenie warstwy naprawczej;
- Wykonanie warstwy naprawczej (np. z betonu, polimero-betonu lub epoksydu);

Technologia złącza podatnego jest innowacyjnym rozwiązaniem opracowanym w Politechnice Krakowskiej [10] i jest chroniona prawem patentowym oraz know how. Polimery podatne PM, PS i PT, wykorzystywane w technologii polimerowych złącz podatnych, należą do grupy nowoczesnych materiałów produkowanych przez SIKAPOLAND, opracowywanych

w ramach współpracy z Politechniką Krakowską. Złącza podatne bazują na materiałach o właściwościach hipersprężystych, stąd prawidłowy dobór polimeru i jego grubości jest sprawą kluczową i powinien być powierzony specjalistom.



Rys. 6. Kolejne etapy wykonania podatnej warstwy czepnej: A – słabe podłoże betonowe, B – warstwa gruntująca, C – warstwa łącząca wykonana z polimerowego złącza podatnego, D – posypka mineralna, stanowiąca podłoże pod warstwę naprawczą

5. Podsumowanie

Przedstawiona analiza wykazała, że materiały naprawcze o dużej sztywności i wytrzymałości (np. epoksydowe, betony polimerowe) cechują się stosunkowo dużymi współczynnikami termiczno-naprężeniowymi TN . Nawet przy stosunkowo niewielkim gradiencie temperaturowym generują one duże naprężenia termiczne na styku z naprawianym podłożem, powodując ich odspojenie w przypadku zdegradowanych podłoży betonowych o niewielkiej wytrzymałości, czyniąc ten rodzaj naprawy nieefektywnym.

Rozwiązaniem tego problemu jest zastosowanie polimerowych złączy podatnych, jako warstwy łączącej słabe podłoże z wysokowytrzymałymi systemami naprawczymi. Zaproponowane złącze podatne, dzięki większej odkształcalności granicznej i współczynnikowi TN niższemu o kilka rzędów w porównaniu do betonu i epoksydu, umożliwia przeniesienie obciążeń termicznych przy występowaniu dużych deformacji. Te korzystne cechy proponowanej warstwy szczepnej pozwalają zapewnić ciągłość połączenia na styku pomiędzy sztywnymi materiałami o różnej temperaturze pracy, zmiennej w czasie.

Literatura

1. Tedeschi C., Kwiecień A., Valluzzi M.R., Binda L., Zając B. Thermal ageing and salt decay on bond between FRP and masonry. *Materials and Structures* (2014) 47: 2051–2065.
2. Valluzzi, M.R.; Garbin E.; Panizza M.; Binda L. & Tedeschi C. Moisture and Temperature Influence on FRP Masonry Bonding. In: *Proc. XII International Conference on Durability of Building Materials and Components*, Porto 2011.
3. Czarnecki L., Chmielewska B. Uszkodzenia i naprawy posadzek przemysłowych. XXIII Ogólnopolska Konferencja WPPK Naprawy i wzmocnienia konstrukcji budowlanych, t. I, Szczyrk 2008.
4. Binda L., Charola A.E., Baronio G. Deterioration of porous materials due to salt crystallization under different thermohygrometric conditions. In: *5th International conference on deterioration and conservation of stone*, Losanna, 1985, pp 279–288
5. Zając B., Kwiecień A. Thermal stress generated in masonries by stiff and flexible bonding materials. *Proceedings of the 9th International Masonry Conference 2014 in Guimarães*, ID_1629.
6. Kwiecień A. Uszkodzenia betonowych nawierzchni lotniskowych. XXIV Konferencja Naukowo-Techniczna, Awary Budowlane'09, Szczecin-Międzyzdroje 2009.
7. Kwiecień A., Gruszczyński M., Zając B. Tests of flexible polymer joints repairing of concrete pavements and of polymer modified concretes influenced by high deformations, *Trans Tech Publications* 2011. *Key Engineering Materials* Vol. 466 (2011), pp. 225–239.

8. Czarnecki L., Łukowski P., Śliwiński J. Materiałowe uwarunkowania awarii i napraw konstrukcji z betonu. XXV Konferencja Naukowo-Techniczna, Awarie Budowlane'11, Szczecin-Międzyzdroje 2011.
9. Głodkowska W., Garbacz A. Zagadnienie kompatybilności materiałowej w naprawach i wzmacnianiu konstrukcji betonowych. Inżynieria i Budownictwo 1/2012, pp. 13–17.
10. Kwiecień A. Polimerowe złącza podatne w konstrukcjach murowych i betonowych. Monografia nr 414, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Seria Inżynieria Lądowa, Kraków, s. 250.
11. Zając B. Potentials of using PU in structural joints in civil engineering considering aspect of thermal work. Science and Technology Conference "Polyurethanes 2013 –current development trends", 10/2013 Ustron, Poland, Volume: O21
12. Dębska D. Wpływ środowiska ciekłego na trwałość betonu cementowego z kruszywem dolomitowym, Ochrona przed Korozją (Corrosion Protection), SIGMA-NOT, 56, 4, 2013, 134–143.
13. Dębska D. The impact of liquid environments containing Mg^{2+} and SO_4^{2-} ions on the durability of cement concrete with limestone aggregates, Ochrona przed Korozją (Corrosion Protection), SIGMA-NOT, 57, 4, 2014, 124–128.
14. Dębska D. Wpływ siarczanu sodu i magnezu na trwałość betonów z kruszywem węglanowym, Przegląd Budowlany, 5, 2014, 14–17.
15. ITB ZUAT-15/VI.02/2004: Wyroby do napraw uszkodzonych konstrukcji z betonu.

Podziękowanie: Autor składa podziękowania firmie SIKA-Poland za dostarczenie materiałów do badań.

IMPORTANCE OF DEFORMABILITY OF REPAIR CONNECTION IN THE CONSTRUCTIONS MADE OF BRITTLE MATERIALS THERMALLY LOADED

Abstract: This paper presents the issues related to the repair of damaged concrete structures, together with the proposed method of repair and prevent further degradation associated with the use of harsh environmental conditions of temperature and chemical interaction. The proposed repair method (Flexible Joint Method), using a flexible connection, allows maintaining long-term sustainability elements of brittle materials under varying environmental conditions. The paper contains the results of laboratory tests and proposal of the flexible adhesive construction, protecting weak concrete surfaces of low strength. This issue is important for the description of the concrete work in aggressive environments in a wide temperature range. Results can be used in the description of the issues related to the durability of both: concrete elements and their connections.

Keywords: durability, concrete repair, damages reasons, shrinkage, thermal loads, thermal elongation.