

Wpływ technologii kształtowania przerw roboczych w aspekcie zachowania właściwej nośności ścian zbiorników i kominów żelbetonowych

Prof. dr hab. inż. Mieczysław Kamiński, dr inż. Marek Maj, mgr inż. Piotr Kmiecik, Politechnika Wroclawska

1. Wprowadzenie

Problem dobrego połączenia w przerwach roboczych dwóch części jednej konstrukcji jest podobny do połączeń występujących w żelbetonowych konstrukcjach zespolonych. Żelbetonowe konstrukcje zespolone to takie konstrukcje, w których przekrój poprzeczny składa się z betonu ułożonego wcześniej np. w zakładzie prefabrykacji lub na budowie i betonu wykonanego później, połączonych zbrojeniem lub połączonych bez zbrojenia. Zespolenie dotyczy więc elementów wykonanych w różnym i odległym czasie, dzięki czemu połączone części składowe konstrukcji w obliczeniach mogą być traktowane jako jeden element konstrukcyjny.

Uszczelnienie, usprawnienie pracy łącza, można uzyskać przez dodatki chemiczne, tekstylne oraz konstrukcyjne. Dobre łącze w przerwie roboczej może też być uzyskane poprzez stosowanie odpowiednich kształtek stalowych, z tworzyw sztucznych polepszających przyleganie i współpracę warstw łączonych. Mimo dużej pracochłonności i wysokich kosztów, rozwiązania te powoli zdobywają sobie uznanie. W niniejszej pracy skoncentrowano się tylko na przerwie roboczej jako przerwie w betonowaniu lub powstałej przy uzupełnieniu wybudowanej konstrukcji tylko mieszanką betonową.

2. Technologia przygotowania przerwy roboczej, przed dalszym betonowaniem. Wymagania dotyczące ścian zbiorników i kominów

Aby konstrukcję można było uznać za zespoloną należy spełnić następujące warunki [1]:

- zachowana jest nośność na ścinanie podłużne połączenia betonu pierwotnego z betonem uzupełniającym,

- zachowana jest ciągłość w przekazywaniu sił wewnętrznych przez elementy współpracujące oraz między nimi,

- zapewniona jest taka sama szczelność łącza, jak całej konstrukcji,

- zapewniona powinna być ta sama izolacyjność cieplna, chemiczna, jak całej konstrukcji,

- klasa betonu uzupełniającego jest nie niższa niż C16/20,

- grubość warstwy betonu uzupełniającego jest nie mniejsza niż 40 mm.

Według normy [12] mieszankę betonową powinno się układać nie później niż po trzech godzinach przerwy w betonowaniu lub dopiero po częściowym stwardnieniu betonu. Pierwszy przypadek jest trudny do utrzymania w przypadku stosowania deskowania przestawnego, dlatego uwaga Autorów skupia się na drugim przypadku.

Uzyskanie właściwej nośności złącza uwarunkowane jest również odpowiednim reżimem technologicznym przygotowania powierzchni, na której będzie wylewana nowa warstwa. Powierzchnia przewidziana do zespolenia powinna być:

- szorstka,

- oczyszczona,

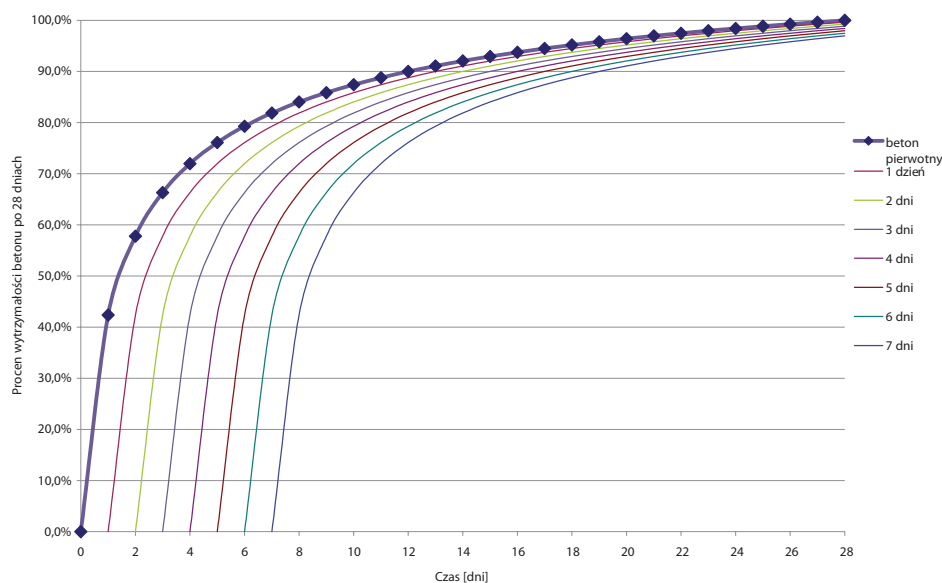
- bez zacieków mleczka cementowego,

- odpowiednio nawilżona bezpośrednio przed betonowaniem,

- dopuszcza się stosowanie środków zwiększających trwale przyczepność obu betonów,

- konsystencja betonu uzupełniającego powinna umożliwiać odpowiednią urabialność mieszanki bez segregacji składników oraz jej pełne zagęszczenie w danych warunkach wykonania konstrukcji.

Jednakże w przypadku betonów wyższej klasy oraz o dużej szczelności zawilgocenie może mieć niekorzystny wpływ na wytrzymałość połączenia [2]. Jest



Rys. 1.
Różnice wytrzymałości betonu na ściskanie i rozciąganie w stosunku do wytrzymałości warstwy betonu pierwotnego przerwy roboczej

to spowodowane tym, że nadmiar wody utrudnia wnikiwności zaczynu nowego betonu w pory warstwy „starego betonu” lub prefabrykatu.

Dla gładkiej powierzchni styku nośność na ścinanie podłużne wykazuje duże rozrzuty wartości. Oprócz tego z badań wynika [3], że płaszczyzna chropowata pozwala na przeniesienie o około 70% większych naprężeń ścinających styk, w porównaniu do powierzchni gładkiej. W związku z powyższym należy unikać stosowania, o ile to możliwe, powierzchni gładkich. W takim wypadku należy odpowiednio przygotować warstwę styku betonów. Generalnie dla podłoża betonowych klas $\leq C30/37$ zalecane są mniej agresywne obróbki (piaskowanie, strumień wody o niskim ciśnieniu), które nie generują rys obniżających przyczepność, a w przypadku wyższych klas korzystne są bardziej agresywne obróbki (groszkowanie, metoda hydrodynamiczna), które znacznie rozwijają profil powierzchni, poprawiając mechaniczne zakotwienie nadbetonu [4].

3. Cechy wpływające na jakość zespolenia

Czynniki wpływające na jakość zespolenia przerwy roboczej można podzielić na trzy grupy [5]:

- charakterystyka podłoża betonowego (cechy betonu, mikrozarysowanie, wilgotność chropowatość, czystość),
- nałożenie betonu na powierzchnię przerwy roboczej (wstępne zwilżenie, ewentualne warstwy szczerwne, cechy nadbetonu, technika układania, zagęszczenie),
- pielęgnacja okolicy przerwy roboczej (pielęgnacja, czas, wczesne obciążenie, zmęczenie, oddziaływanie środowiska).

Najważniejsze z nich to: mikrozarysowanie, wilgotność, czystość, zagęszczenie i pielęgnacja. Ponadto badania wskazują [14], że istotnym parametrem kształującym przyczepność warstwy przerwy robo-

czej jest chropowatość powierzchni. Cecha ta wykazuje silną zależność m.in. z przypowierzchniową wytrzymałością na rozciąganie podłoża betonowego.

4. Wpływ długości przerwy roboczej na nośność styku

Wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie betonu zależy od wielu czynników, m.in. od rodzaju cementu, temperatury i warunków pielęgnacji. Przy średniej temperaturze 20°C i właściwych warunkach pielęgnacji, oszacowania wytrzymałości betonu na ściskanie i rozciąganie poniżej 28 dnia dojrzewania można dokonać za pomocą mnożnika β_{cc} , który obrazuje procent wytrzymałości 28-dniowej [6]:

$$\beta_{cc} = e^s \left[1 - \sqrt{\frac{28}{t}} \right] \quad (1)$$

gdzie:

t – wiek betonu w dniach, $t < 28$ dni,

s – współczynnik zależny od rodzaju cementu:

$s = 0,20$ dla cementów klasy R (np. CEM 45,5R, CEM 52,5N, CEM 52,5R),

$s = 0,25$ dla cementów klasy N (np. CEM 35,5R, CEM 42,5),

$s = 0,38$ dla cementów klasy S (np. CEM 35,5N).

Jak pokazano na rys. 1 różnice pomiędzy stopniem osiągnięcia wytrzymałości f_c i f_t 28-dniowej pomiędzy betonami w warstwie roboczej, zależą od stopnia dojrzałości betonu warstwy pierwotnej. Ma to podstawowe znaczenie w stadium realizacyjnym obiektu, kiedy oba betony nie osiągnęły jeszcze pełnej wytrzymałości. W tej fazie podstawowym czynnikiem wpływającym na nośność styku jest przyczepność pomiędzy betonami. Niestety w czasie dojrzewania obu betonów w przerwie roboczej, przyrosty wytrzymałości betonu i nośności styku nie są jednakowe [7]. Mianowicie nośność styku zmniejsza się ze wzrostem wie-

ku betonu pierwotnego w chwili dobetonowania (im beton pierwotny w chwili dobetonowania jest młodszy, tym styk wykazuje większą nośność po 28 dniach pielęgnacji nadbetonu). Wynika to z tego, że w młodym betonie warstwy pierwotnej, intensywniej zachodzą jeszcze procesy hydratacji cementu, co skutkuje większą przyczepnością obu warstw. O konstrukcjach zespolonych w klasycznym ujęciu mówimy wtedy, gdy dojrzewanie elementu już wykonanego zostało zakończone. Jednak już w pierwszych dniach dojrzewania betonu pierwotnego, przy odpowiednich warunkach pielęgnacji, osiąga on kilkudziesięcioprocen-tową wytrzymałość co wpływa na powstanie znacznej różnicy pomiędzy wytrzymałością warstwy nadbetonu w stosunku do warstwy zakończonej przed przerwą roboczą. Pozwala to na możliwość dokonania analizy warstwy stykowej analogicznie do zespolonej konstrukcji żelbetowej (typu beton-beton).

5. Ścinanie w styku pomiędzy betonami ułożonymi w różnych terminach

Nośność elementów zespolonych w przekrojach normalnych i ukośnych oblicza się według tych samych zasad, które przyjmowane są dla elementów jednorodnych, pod warunkiem nie przekroczenia nośności złącza na podłużne ścinanie. Naprężenia styczne w płaszczyźnie styku betonów, które stwardniały w różnych terminach powinny spełniać warunki [8]:

$$V_{Edi} \leq V_{Rdi} \tag{2}$$

$$V_{Edi} = \beta \frac{V_{Ed}}{z b_i} \tag{3}$$

$$V_{Rdi} = \underbrace{c f_{ctd}}_{\text{adhezja}} + \underbrace{\mu \sigma_n}_{\text{tarcie}} + \underbrace{\rho f_{yd} (\mu \sin \alpha + \cos \alpha)}_{\text{zbrojenie zszywające}} \leq 0,5 v f_{cd} \tag{4}$$

gdzie:

V_{Rdi} – obliczeniowa nośność na ścinanie w płaszczyźnie zespolenia,

V_{Edi} – obliczeniowa wartość naprężenia stycznego w płaszczyźnie styku,

β – stosunek siły podłużnej działającej na przekrój poprzeczny nowego betonu do całej siły podłużnej, działającej w rozważanym przekroju w strefie ściskanej, albo rozciąganej,

V_{Ed} – siła poprzeczna,

z – ramię sił wewnętrznych w przekroju zespolonym,

b_i – szerokość płaszczyzny zespolenia,

f_{ctd} – wytrzymałość obliczeniowa betonu na rozciąganie określona dla betonu niższej klasy,

c – współczynnik zależny od rodzaju powierzchni prefabrykatu,

σ_n – naprężenie wywołane przez siłę prostopadłą do płaszczyzny zespolenia,

μ – współczynnik tarcia przy ścinaniu,

$\rho = A_s / A_i$ – stopień zbrojenia na ścianie podłużne,

A_s – pole przekroju zbrojenia poprzecznego w złączu,
 A_i – pole powierzchni płaszczyzny zespolenia,
 f_{yd} – obliczeniowa granica plastyczności zbrojenia zszywającego,

α – kąt pomiędzy płaszczyzną złącza a zbrojeniem na ścinanie, zawarty w przedziale $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$,

f_{cd} – wytrzymałość obliczeniowa betonu na ściskanie,

v – współczynnik redukcji wytrzymałości betonu zarysowanego przy ścinaniu.

Zarówno adhezja jak i tarcie uzależnione jest od sposobu przygotowania powierzchni. W związku z różnymi technologiami wykonania warstwy stykowej określono następujące rodzaje powierzchni styku zespolenia:

- bardzo gładka – uzyskiwana w formie stalowej, z tworzyw sztucznych lub w gładkiej formie drewnianej,
- gładka – uzyskiwana w formie ślizgowej lub metodą prasowania, a po wibrowaniu swobodnie powierzchnie pozostawione są bez dodatkowych zabiegów,
- szorstka – pozostawiona w stanie szorstkim po zabetonowaniu np. poprzez poddanie zabiegowi zgrabienia wywołującego bruzdy o głębokości nie mniejszej niż 3 mm w rozstawie nie większym niż 40 mm, lub poprzez odsłonięcie kruszywa lub inne metody przynoszące podobne skutki,
- z wrębami – celowo ukształtowana powierzchnia z wcięciami, ukształtowana zgodnie z wytycznymi normowymi.

Dzięki powyższej klasyfikacji, poszczególnym rodzajom powierzchni (rodzajom złącz) można przypisać współczynnik określający nośność na podłużne ścinanie spowodowaną adhezją.

W przypadku obciążeń zmęczeniowych lub dynamicznych wartości współczynnika c należy zmniejszyć do połowy, a jeżeli złącze podlega rozciąganiu – nie należy uwzględniać adhezji.

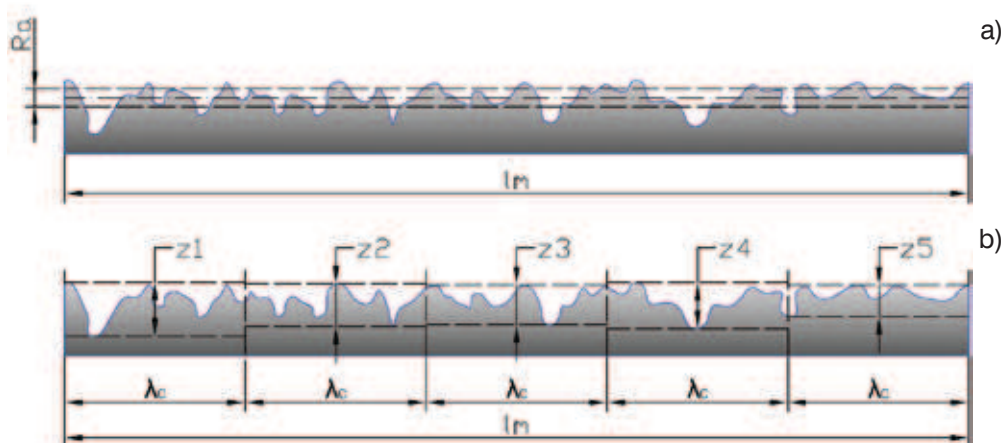
Współczynnik tarcia μ zależny jest również od sposobu przygotowania powierzchni prefabrykatu. Warunki

Tabela 1. Współczynnik c dotyczący adhezji zależny od rodzaju powierzchni prefabrykatu

Rodzaj powierzchni	Eurocode 2	PN-B-03264:2002	Model Code 2010
	c	kT	c
Bardzo gładka	0,025 ÷ 0,10	0,02	0,025
Gładka	0,20	0,35	0,35
Szorstka	0,40	0,45	0,45
Z wrębami	0,50	0,50	0,50

Tabela 2. Współczynnik tarcia μ zależny od rodzaju powierzchni prefabrykatu

Rodzaj powierzchni	Eurocode 2, PN-B-03264:2002, Model Code 2010
Bardzo gładka	0,5
Gładka	0,6
Szorstka	0,7
Z wrębami	0,9
Monolit	1,0



Rys. 2.
Pomiar chropowatości powierzchni:
a) średnia chropowatość R_a ;
b) średni skok wysokości powierzchni $R_{z(DIN)}$

normowe przewidują ograniczenie poziomu naprężeń normalnych σ_n do wartości 60% obliczeniowej wytrzymałości betonu na ściskanie f_{cd} .

6. Pomiar chropowatości warstwy stykowej

Jak przedstawiono powyżej, nośność styku zespolenia na ścinanie podłużne, zależy w dużej mierze od stopnia przygotowania warstwy stykowej, w tym stopnia chropowatości powierzchni przy przerwie roboczej. Podstawową trudność w praktyce budowlanej stanowi określenie rodzaju powierzchni (gładka, szorstka). Istnieje wiele parametrów opisujących jakość przygotowania powierzchni. Jednym z nich jest tzw. średnia chropowatość R_a określona na pewnej długości l_m , która reprezentuje średnie odchylenie profilu wysokości od powierzchni środkowej [8].

$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} y(x) dx \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (5)$$

gdzie: l_m – długość, na której dokonuje się pomiaru chropowatości, $y(x)$ – wysokość badanej powierzchni w odległości x od początku bazy pomiarowej.

Innym parametrem określającym chropowatość jest średni skok wysokości powierzchni $R_{z(DIN)}$. Określa on średnią z maksymalnej wysokości uskoku powierzchni z_i badaną na kolejnych przedziałach λ_c bazy pomiarowej l_m .

$$R_{z(DIN)} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 z_i \quad (6)$$

Opisane wyżej metody pomiaru topologii powierzchni przerwy roboczej stanowią podstawę do określenia rodzaju powierzchni, który z kolei ma podstawowy wpływ na obliczenie składników nośności związanych z adhezją oraz z działaniem tarcia.

Pomiar średniej chropowatości R_a oraz średniego skoku wysokości powierzchni $R_{z(DIN)}$ może być dokonywany zaawansowanymi metodami np. za pomocą profilometru stykowego lub bezstykowego optycznego, bądź przy pomocy techniki fotogrametrycznej. Wszystkie te metody mają jednak swoje zastosowanie głównie podczas wykonywania badań laboratoryjnych.

Przegląd aktualnych metod badawczych związanych z oceną szorstkości powierzchni zawarto w pracy [14]. Najpowszechniej stosowanymi na budowie metodami są ocena wizualna oraz metoda piaskowa. Wizualna ocena jakościowa tekstury powierzchni polega na porównaniu powierzchni przerwy roboczej z wzorcami profilu powierzchni betonu CSP (ang. *Concrete Surface Profile*) wprowadzonymi przez International Concrete Repair Institute. Inną niezwykle prostą metodą pomiaru chropowatości powierzchni na budowie jest metoda piaskowa (ang. *sand patch method*). Rozróżnić tutaj można m.in.:

- metodę płamy piaskowej wg [9],
- pomiar głębokości makrotekstury powierzchni metodą objętościową wg [10],
- metoda Kaufmanna [11] rekomendowana w Model Code 2010.

Ogólnie metoda piaskowa polega na rozproszaniu na badanej powierzchni drobnego piasku o znanej objętości V oraz pomiarze jego powierzchni (średnicy d). Podczas badań powierzchnia betonu powinna być sucha oraz oczyszczona miękką szczotką. Piasek wsypywany jest z naczynia z naniesioną skalą objętości. W czasie silnych lub porywistych wiatrów należy wcześniej ostonić z trzech stron badane miejsce. Wyrównanie powierzchni następuje za pomocą płytki, tak aby całkowicie wypełnić depresje poniżej górnych ziaren wystającego kruszywa. Metoda piaskowa nie jest tak dokładna jak opisane wcześniej, lecz wystarczająca do pomiarów praktycznych na budowie. Niestety pomiary można wykonać jedynie na powierzchniach płaskich lub lekko pochylonych. Zależącej tej metody jest prostota i szybkość pomiarów. W pracy [14] wskazano, że test piaskowy daje dobre oszacowanie uśrednionego profilu chropowatości.

Tabela 3. Zależność rodzaju powierzchni od jej chropowatości R_a

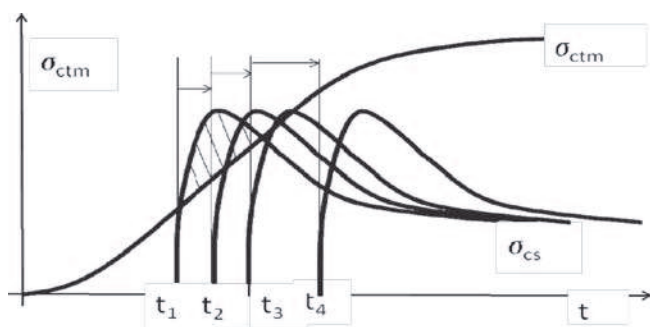
Rodzaj powierzchni	Średnia chropowatość R_a [mm]
Bardzo gładka	niemierzalna
Gładka	< 1,5 mm
Szorstka	≥ 1,5 mm
Bardzo szorstka	≥ 3 mm

Tabela 4. Metody oceny parametrów chropowatości powierzchni

Metoda badawcza	EN 1766	EN 13036-1	Metoda Kaufmanna
Parametr oceny chropowatości powierzchni	Wskaźnik chropowatości powierzchni	Średnia głębokość makrotekstury	Parametr chropowatości
Zależność	$SRI = \frac{V_{SRI}}{d_{SRI}^2} \cdot 1272 [mm]$	$MTD = \frac{4 \cdot V_{MTD}}{\pi \cdot d_{MDI}^2} [mm]$	$R = \frac{40 \cdot V}{\pi \cdot d^2} [mm]$
Oznaczenia we wzorach	V_{SRI} – objętość użytego piasku [ml], d_{SRI} – wartość średnia zaokrąglona do 1 mm średnicy płamy piasku [mm]	V_{MTD} – objętość materiału ziarnistego [mm ³], d_{MDI} – średnica koła pokrytego przez materiał ziarnisty [mm]	V – objętość użytego piasku [ml], d – średnica koła piasku [cm]

7. Wpływ skurczu na wytrzymałość połączenia w przerwie roboczej

Wykonanie przerwy roboczej przypada w takim okresie dojrzewania mieszanki betonowej, w którym bądź zostały w większej części zakończone procesy reologicznej w warstwie betonu już ułożonej, bądź są w fazie początkowej. Wg [13, 14, 15] mogą wystąpić problemy z przekroczeniem wytrzymałości na rozciąganie przez naprężenia skurczowe w nowo układanym fragmencie konstrukcji gdy mamy do czynienia z pierwszym przypadkiem. Wynika po pierwsze ze swoistego wyścigu pomiędzy wzrastającymi naprężeniami skurczowymi σ_{cs} a wzrastającą wytrzyma-



Rys. 3. Przyrost naprężeń od skurczu w porównaniu do wzrostu wytrzymałości betonu na rozciąganie na podst. [13]

ścią graniczną σ_{ctm} na rozciąganie dojrzewającego betonu (rys. 3). Po drugie w przerwie roboczej nowo wylany tężący i kurczący się beton napotyka na więzi zewnętrzne poprzedniej warstwy, które nie pozwalają na swobodne odkształcenie. Powoduje to naprężenia rozciągające w nowej warstwie i ściskające w poprzednio ułożonej. Może to doprowadzić do znacznych zarysowań. Sytuacji tej można unikać lub znacznie załagodzić poprzez odpowiednią pielęgnację betonu i odsuwanie w czasie narastających naprężeń skurczowych (rys. 3), lub zmianami składników betonu (zmniejszenie czynnika c/w) lub dodatkowe zbrojenie na skurcz w obrębie przerwy roboczej [15].

8. Wnioski

Łącze dwóch warstw betonu powstałe podczas przerwy roboczej aby mogło spełniać warunki ciągłości i szczelności powinno być starannie wykonane. Na jakość łącza składa się staranność na poziomie projektowania, doboru technologii budowy i wykonania, a także odpowiedniej eksploatacji budowli. Należy liczyć się z osłabieniem wytrzymałości w miejscu przerwy roboczej, a także z występowaniem dodatkowych naprężeń w obszarze łącza.

BIBLIOGRAFIA

- [1] PN-B-03264:2002
- [2] Ligęza W., Połączenie betonu nowego i starego w świetle badań własnych. III Konferencja Naukowa Konstrukcje Zespólone, Referaty, Zielona Góra, 1993, s. 89-96.
- [3] Priebe H., Szumocki J., Współpraca dwóch betonów w zespolonych belkach żelbetonowych. Konstrukcje zespolone. I konferencja naukowa, Referaty, Zielona Góra, 1986, s. 135-142
- [4] Piotrowski T., Zastosowanie analizy sygnału impact-echo do oceny jakości zespolenia w układach naprawczych betonu. Rozprawa Doktorska. Politechnika Warszawska. Warszawa, 2009
- [5] Silfverbrand J., Beushausen H., Bonded concrete overlays – aspects concerning bond strength. Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, ed. Alexander M. i inni, s. 19-21. London, 2006
- [6] PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2 – Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [7] Franczak D., Halicka A., Wpływ wieku betonu na nośność styku w żelbetonowych elementach zespolonych. Konstrukcje zespolone t. IX. s. 45-56. Zielona Góra 2011
- [8] Model Code 2010 (First complete draft). International Federation for Structural Concrete (fib), Vol. 1 – Bulletin 55, Vol. 2 – Bulletin 56. Lausanne, 2010
- [9] PN-EN 1766:2001 Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych – Metody badań – Betony wzorcowe do badań
- [10] PN-EN 13036-1:2010 Cechy powierzchniowe nawierzchni drogowych i lotniskowych – Metody badań – Część 1: Pomiar głębokości makrotekstury metodą objętościową (oryg.)
- [11] Kaufmann, N., Das Sandflächenverfahren. Strassenbau-Technik 3/24 (1971), s. 131-135
- [12] PN-B-06251_1963. Roboty betonowe i żelbetowe. Wymagania techniczne
- [13] Flaga K., Zbrojenie przeciwskurczowe, obliczenia, zalecenia konstrukcyjne w budownictwie powszechnym XVII Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji Ustroń, 20-23 lutego 2002 r.
- [14] Seruga R., Szydłowski M., Zych M., Ocena postępującego procesu zarysowania ścian cylindrycznych w monolitycznych zbiornikach żelbetonowych, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2008
- [15] Awaryjne zarysowanie ścian zbiornika spowodowane skurczem, Inżynier Budownictwa 2009-10-14