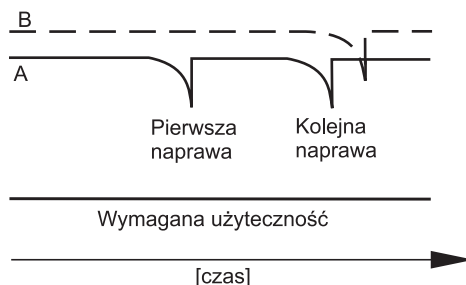


7. TRWAŁOŚĆ BETONOWYCH KONSTRUKCJI MOSTOWYCH

1. WPROWADZENIE

Trwałość elementów budowlanych zależy od jakości użytego w nich betonu. Obniżona trwałość konstrukcji betonowej prowadzi przede wszystkim do konieczności przeprowadzania niezbędnych napraw lub wzmocnień. Wiąże się to z ponoszeniem dodatkowych kosztów, co skłania do poszukiwania metod zwiększenia odporności na wszelkiego rodzaju chemiczne i fizyczne czynniki destrukcyjne. Kluczem do utrzymania wymaganej użyteczności obiektu – w zakładanym czasie jego eksploatacji – jest zagwarantowanie wysokiej trwałości betonowych konstrukcji. W publikacji rozważano trwałość konstrukcji mostowych, wykonanych z betonu. Całkowite koszty związane z zapewnieniem wymaganego poziomu użyteczności obiektu są sumą nakładów na czynności utrzymania (w tym naprawy bieżące) oraz nakładów początkowych. Szczególnie istotna w kontekście trwałości betonowych konstrukcji jest wielkość nakładów początkowych, na które składają się koszty rozwiązań projektowych oraz materiałowych. W przypadku zwiększenia nakładów początkowych na uzyskanie rozwiązania optymalnego dla danych warunków eksploatacji, można spodziewać się obniżonych kosztów bieżących utrzymania w założonym okresie eksploatacji (rys. 1) [1, 13].



Rys. 1. Koszt eksploatacji konstrukcji w czasie oraz użyteczność, w odniesieniu do konstrukcji o normalnej (A) i zwiększonej (B) trwałości [13]

Fig. 1. The cost of exploitation of structure at the time and usability in relation to the normal (A) and higher (B) stability of structure [13]

2. PODSTAWY PROJEKTOWANIA I WYKONANIA KONSTRUKCJI

Mostownictwo jest dziedziną budownictwa charakteryzującą się wysokim stopniem złożoności. Jej złożona natura wynika z konieczności uwzględnienia wielu czynników przy projektowaniu i budowie mostów. Spełnienie tylko podstawowego nie jest

niestety wystarczające. Aby mieć gwarancję wyboru najwłaściwszego w danej sytuacji rozwiązania, należy wziąć pod uwagę wiele dodatkowych aspektów, które precyzowane są na podstawie przeróżnych analiz wykonywanych przed projektowaniem i budowy mostów [6, 7, 11]. Według Eurokodu 0, obok użyteczności i nośności, trwałość konstrukcji jest jednym z trzech podstawowych założeń przyjmowanych w trakcie procesu projektowania, a także istotnie wpływa na zatwierdzone rozwiązania, zarówno materiałowe, jak i konstrukcyjne [2]. Zgodnie z Eurokodem 2 „konstrukcję należy zaprojektować i wykonać w taki sposób, aby w zamierzonym okresie użytkowania (...) przejmowała wszystkie oddziaływania i wpływy, których oddziaływania można oczekiwać podczas wykonania i użytkowania oraz pozostała przydatna do przewidzianego użytkowania. Konstrukcję należy zaprojektować tak, aby jej nośność, użyteczność i trwałość była należąca. (...) Konstrukcję należy w taki sposób projektować, aby zmiany następujące w projektowym okresie użytkowania, z uwzględnieniem wpływów środowiska i przewidywanego poziomu utrzymania, nie obniżały właściwości użytkowych konstrukcji poniżej zamierzonego poziomu” [3]. Eurokod 2 stanowi, iż trwałość obiektu jest zachowana, gdy w założonym czasie konstrukcja pełni przeznaczone funkcje w zakresie użyteczności (stany graniczne związane z ograniczeniem naprężeń, rys i ugięć), nośności i stateczności (stany graniczne nośności). Właściwe zaprojektowanie konstrukcji gwarantuje spełnienie wymagań użytkowych minimum przez okres spodziewanej trwałości. Faktycznie trwałość wzniesionej konstrukcji obciążona jest znacznym poziomem niepewności. Związana jest, z jednej strony, z pewnymi wadami projektowymi, wykonawczymi i materiałowymi, bardzo często niemożliwymi do uniknięcia. Z drugiej strony w procesie projektowania nie ma możliwości przewidzieć wszystkich oddziaływań związanych z użytkowaniem obiektu. Wymagania dotyczące trwałości konstrukcji mostowych są bardzo wysokie. Według EC 0 mosty należą do kategorii (klasy) konstrukcji S5, czyli orientacyjny projektowany okres użytkowania wynosi minimum 100 lat [2]. Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej nr 735 z dn. 30 maja 2000 r. w sprawie warunków technicznych, którym powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie, uściśla te wymagania w odniesieniu do konkretnych części konstrukcji mostowej. Odnośnie do poszczególnych elementów konstrukcji mostowych wymagana jest następująca trwałość: podpory mostowe, masywne przyczółki i konstrukcje oporowe – 100-200 lat; podpory wiaduktów, lekkie przyczółki, ustroje nośne belkowe i skrzynkowe – 60-80 lat; masywne konstrukcje łukowe i płytowe – 100 lat; pomosty – 30-40 lat; chodniki, belki poręczowe, nawierzchnie jezdni – 10-20 lat [10]. Jak wynika z przedstawionego tekstu, w wielu przypadkach wymagana trwałość przekracza 50 lat. Okres ten jest przyjmowany według PN-EN 206-1 jako podstawowy okres trwałości betonu. Czas ten zagwarantowany jest wówczas, gdy spełnione są wymagania dotyczące składu i składników, podanych w normie w odniesieniu do poszczególnych klas ekspozycji betonu.

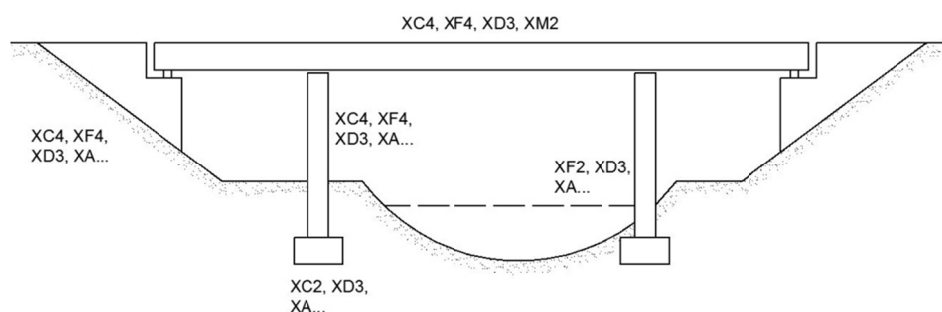
3. ODDZIAŁYWANIA WPLYWAJĄCE NA TRWAŁOŚĆ KONSTRUKCJI

Oddziaływania środowiskowe na obiekty mostowe są znane, a szczególne znaczenie ma tu interakcja oddziaływań fizycznych, chemicznych i mechanicznych. Konstrukcja mostowa narażona jest bezpośrednio na działanie zmiennych warunków atmosferycznych oraz skażenia naturalnego środowiska w wyniku działania następujących czynników:

- agresywne działanie atmosfery wskutek zanieczyszczeń chemicznych,
- promieniowanie słoneczne,

- cykliczne oddziaływania temperatury o zmiennym znaku,
- opady atmosferyczne,
- erozyjne działanie wód, ewentualnie zanieczyszczonych związkami chemicznymi,
- środki chemiczne stosowane do zimowego utrzymania dróg,
- prądy błędzące, pochodzące od trakcji elektrycznej, które mogą wywołać niszczenie betonu i stali wskutek zachodzących procesów fizycznych i chemicznych.

Na procesy degradacji betonu w wyniku oddziaływania środowiska wpływają oddziaływania mechaniczne od obciążeń użytkowych, niekorzystne są też znaczne obciążenia stałe, jak i obciążenia zmienne wywołane ruchem pojazdów, oraz działaniem wiatru. Powstanie naprężeń powyżej tzw. naprężeń krytycznych może wywołać proces mikropęknięcia, a naprężenia zmienne o charakterze wielokrotnie powtarzalnym mogą przyspieszyć proces degradacji z powodu obniżonej wytrzymałości zmęczeniowej betonu [12]. W zależności od elementu konstrukcyjnego warunki środowiskowe zużywalności betonu są zróżnicowane. Zazwyczaj stanowią kombinację kilku rodzajów oddziaływań (rys. 2).



Rys. 2. Klasy agresywności środowiska z zaznaczonymi strefami oddziaływań na poszczególne elementy konstrukcji mostowej

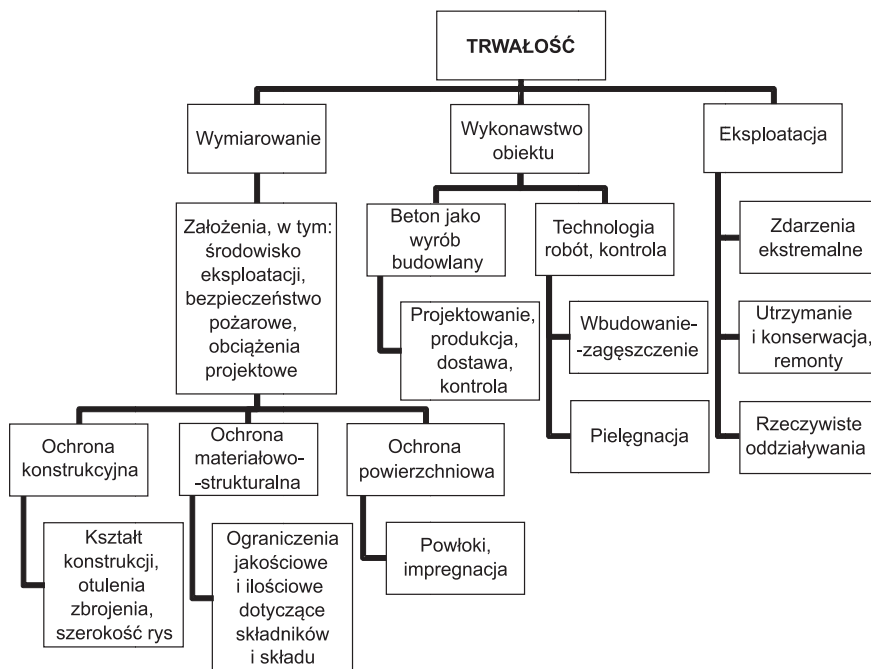
Fig. 2. Aggressiveness of the environment classes with marked influence zones on individual elements of the bridge structure

Agresywne oddziaływanie środowiska na konstrukcje betonowe uporządkowano w normie PN-EN 206-1:2003. Większość powierzchni betonowych konstrukcji mostowych narażona jest na karbonatyzację (klasy XC), zamrażanie i odmrażanie przy udziale soli odładzających, głównie chlorków (klasy XF i XD) oraz intensywnego ścierania (klasy XM) (rys. 3). Wystąpić mogą także agresywne oddziaływania chemiczne (klasy XA) uzależnione od podłoża, wód powierzchniowych i gruntowych. Tworzenie trwałości elementów betonowych obejmuje podejmowane działania na wszystkich etapach ich powstawania, w tym także na etapie wymiarowania konstrukcji, doboru, produkcji i dostaw materiałów oraz technologii wznoszenia (rys. 4). Przechodząc od fazy kształtowania do oceny uzyskanej trwałości, należy listę czynników wpływających na tę ocenę uzupełnić o element niepewności wynikający z realnego przebiegu eksploatacji, w tym poziomu wyteżenia, faktycznej charakterystyki środowiska, zabiegów utrzymania, napraw i remontów oraz zdarzeń ekstremalnych. Najważniejszy etap kształtowania trwałości to wymiarowanie konstrukcji, które w kontekście trwałości obejmuje ochronę konstrukcyjną, materiałowo-strukturalną i powierzchniową. Działania te powinny być podejmowane razem, w zgodzie z zasadą ochrony wielostopniowej.



Rys. 3. Uszkodzenia obiektu mostowego w wyniku agresywnego oddziaływania środowiska [8]

Fig. 3. Damages of the bridge structure from aggressive environmental influences [8]



Rys. 4. Modelowanie trwałości obiektu z betonu [13]

Fig. 4. Modelling of durability object from concrete [13]

Ochrona konstrukcyjna

Ochrona konstrukcyjna odnosi się głównie do trafnego wyboru otuliny i obliczeniowej szerokości rysy w konstrukcji. W zakresie doboru otuliny kierować się

należy wymaganiami podanymi w PN-EN 1992-1, wynikającymi z klas ekspozycji, z zastrzeżeniem konieczności zwiększania grubości otuliny o 10 mm dla elementów narażonych na ścieranie, wywołane zarówno przez tarcie lodu, jak i stały przepływ wody. Odnośnie do maksymalnej szerokości obliczeniowej rysy obowiązują reguły zastrzeżone (tab. 1) w stosunku do wymagań sformułowanych w PN-EN 1992-1. Na etapie wymiarowania, zgodnie z wymaganiami konstrukcyjnymi, dozwolone jest uwzględnienie projektowanego okresu eksploatacji, głównie poprzez dobór grubości otuliny, zależnej od kategorii konstrukcji, wobec czego od założonej trwałości. Szerokość maksymalna rysy obliczeniowej nie wynika natomiast, wg Eurokodów, z projektowanego okresu użytkowania [5, 13].

Tabela 1. Zalecane maksymalne szerokości rys w_{max} [mm] w konstrukcjach mostowych wg PN-EN 1992-2 [4]

Table 1. Recommended maximum crack spacing w_{max} [mm] in the construction of bridges according to EN 1992-2 [4]

Klasa ekspozycji	Elementy żelbetowe i sprężone z ciągniami bez przyczepności. Prawie stała kombinacja obciążeń	Elementy sprężone z ciągniami z przyczepnością. Częsta kombinacja obciążeń
X0, XC1	0,3	0,2
XC2, XC3, XC4	0,3	0,2
XD1, XD2, XD3, XS1, XS2, XS3		odprężenie

Ochrona materiałowo-strukturalna

Postanowienia normy PN-EN 206-1 uwzględniają ochronę materiałowo-strukturalną jako element kształtowania trwałości konstrukcji betonowej w zakresie podstawowym. Norma ta reguluje kryteria doboru ilościowego i jakościowego składu mieszaniny, w zależności od klasy ekspozycji betonu. Nałożone ograniczenia dotyczą zalecanych odmian i rodzajów cementów, minimalnej klasy wytrzymałości na ściskanie, minimalnej zawartości masowej cementu w mieszaninie oraz maksymalnego wskaźnika woda-cement. Dla środowisk typu XF dodatkowym warunkiem jest właściwe napowietrzenie mieszanki betonowej. Spełnienie wymagań normy PN-EN 206-1 zapewnia nominalną trwałość betonu nie mniejszą niż 50 lat. Jednakże dla większości elementów konstrukcji mostowych trwałość na poziomie 50 lat jest niezadowalająca. Należy wobec tego podjąć dodatkowe działania mające na celu zapewnienie większej trwałości (tab. 2). Do działań tych zaliczyć można zindywidualizowane podejście do projektowania otuliny poszczególnych elementów, modyfikacje materiałowe betonu, stosowanie nowoczesnych systemowych rozwiązań ochrony powierzchni konstrukcji oraz ochrony antykorozyjnej zbrojenia. Zwiększenie trwałości obiektów mostowych w zakresie ochrony materiałowo-strukturalnej można uzyskać poprzez optymalizację składu jakościowego i ilościowego betonu oraz wykorzystanie betonów nowej generacji (tab. 3). Betony te są trudniejsze technologicznie, jednakże przy właściwym przebiegu wytwarzania, wbudowania i pielęgnacji, odznaczają się podwyższoną trwałością.

Tabela 2. Działania powodujące zwiększenie trwałość konstrukcji z betonu

Table 2. Activities that give increase the durability of construction from concrete

Działanie	Rodzaj działań	Przykładowe zastosowanie	Uwagi
Ochrona konstrukcyjna	indywidualne projektowanie otuliny zbrojenia	zwiększanie grubości otuliny	problem skurczu otuliny
Ochrona materiałowo-strukturalna	alternatywne modyfikacje betonu	betony wysokowytrzymałe, betony samozagęszczalne, inne betony nowej generacji	zastrzona kontrola czynności technologicznych, w szczególności pielęgnacji
Ochrona powierzchniowa	zastosowanie powłok, impregnatów, wypraw, wykładzin	hydrofobizacja, wypełnianie porów, powłoki cementowo-polimerowe i cementowe	problem przygotowania podłoża, kompatybilność
Ochrona zbrojenia	powierzchniowa, inhibitorowa, anodowo-katodowa	powłoki metaliczne, polimerowe, inhibitory, migrujące inhibitory korozji, anody metaliczne	ograniczona skuteczność, wysoki koszt

Tabela 3. Odmiany betonów nowej generacji oraz zastosowanie w mostownictwie

Table 3. Varieties new generation of concrete and the use in bridge construction

Odmiana betonu	Zastosowanie w mostownictwie
Wysokowytrzymały (BWW)	podpory, dźwigary
Lekki wysokowytrzymały (LBWW)	dźwigary, pomosty
Ultrawysokowytrzymały/na proszkach reaktywnych (BUWW/RPC)	pomosty, krzyżulce, dźwigary
Beton ze zbrojeniem rozproszonym (FRC)	naprawy, wzmocnienia, detale pod obciążeniem dynamicznym
Beton samozagęszczający się (SCC)	prefabrykacja i konstrukcje monolityczne – praktycznie wszędzie możliwe
Wysokopopiołowy (HVFC)	elementy masywne
Polimerowo-cementowy (PCC)	mrozo odporne nawierzchnie mostowe; betony epoksydowo-cementowe; PCC – postmix – naprawy konstrukcji betonowych; beton samonaprawialny
Cementowo-polimerowy o niskiej zawartości polimeru	mieszanki o bardzo długim czasie zachowania własności roboczych
Polimerowy (PC)	elementy odwodnień, systemów tłumienia drgań

Aktualnie na rynku światowym najczęściej wykorzystywane są przede wszystkim betony łączące zalety BWW lub LBWW i SCC. Jeśli w Polsce zostaną uaktualnione i zmodyfikowane wymagania formalne dotyczące budowy mostowych, powstaną przepisy otwarte na nowoczesne rozwiązania i technologie, szczególnie w zakresie techno-

logii betonu, odmiany BWW, LBWW i SCC stworzą nowe możliwości w mostownictwie polskim. Inne nowe odmiany, na przykład: BUWW (w tym także betony z proszków reaktywnych), wysokopopiołowe, samonaprawialne, fibrobetony (w mostownictwie wykorzystywane tylko w ograniczonym zakresie), PCC lub popiołowe betony PC – stanowią jedynie wizję dalszej przyszłości [5, 13].

Ochrona powierzchniowa

Ochrona powierzchniowa odnosi się do zwiększenia szczelności betonu, uzyskiwanej poprzez nałożenie na jego powierzchnię dodatkowej warstwy w postaci powłoki lub impregnatu, który penetruje w pory. Dobór odpowiedniego materiału do ochrony powierzchniowej powinien uwzględniać jej podwyższoną odporność na dane środowisko eksploatacji oraz kompatybilność z podłożem betonowym. Zwykle ten sposób zwiększania trwałości zalecany jest przy naprawach i remontach istniejących konstrukcji, w przypadku konstrukcji nowych stosowany jest rzadziej. Ochrona powierzchniowa betonu powinna odznaczać się dużym oporem dyfuzyjnym względem dwutlenku węgla, wodoszczelnością, ale jednocześnie przepuszczalnością dla pary wodnej, rysoodpornością i elastycznością zapewniającą mostkowanie rys o zmieniającej się w pewnych granicach szerokości, dobrą przyczepnością do betonowego podłoża oraz odpornością na czynniki środowiskowe i starzenie. Impregnaty poprawiają jakość strefy powierzchniowej betonu (emulsje wodne żywic epoksydowych i poliestrowych) lub materiały hydrofobizujące, które nie zmieniają struktury porowatości, zmniejszają nasiąkliwość (silikony). Powłoki (cienkowarstwowe od 0,1 do 1 mm i grubowarstwowe 1-2 mm) wykonywane są z różnych spoiw organicznych. Wyprawy odznaczają się większą grubością jednorodnego materiału na spoiwach mineralnych, polimerowych lub mieszanych, są wielowarstwowe i obejmują materiały nakładane w postaci arkuszy lub okładzin [5, 13].

Ochrona zbrojenia

Dobra ochrona stali zbrojeniowej przed korozją zależy od spełnienia dwóch czynników. Przede wszystkim od jakości i grubości otuliny betonowej oraz od jej ewentualnego zarysowania. Następnie ochrona zbrojenia odnosi się do nakładania powłok na pręty stalowe (cynkowanie, powłoki z PVC i epoksydowe, z zapraw polimerowo-cementowych), wprowadzania do mieszanki betonowej inhibitorów korozji, traktowania betonu stwardniałego migrującymi inhibitorami korozji, stosowania ochrony anodowo-katodowej (element anodowy stanowi docelowe miejsce korozji elektrochemicznej, mocowany jest do zbrojenia, które będąc katodą nie koroduje) [8, 13].

4. PODSUMOWANIE

Obecnie dysponujemy wieloma zaawansowanymi materiałami, dzięki czemu powstaje ogromna liczba odmian betonu nowej generacji. W języku angielskim funkcjonuje już określenie *tailor made concrete*, oznaczające rodzaj betonu jakby „uszytego na miarę” – zaprojektowanego konkretnie do postawionych wymagań. Zarówno eksploatacyjnych wymagań konstrukcyjnych i trwałościowych, jak i technologicznych, związanych z optymalizacją robót. Tak zaprojektowany beton wysokowartościowy (Well De-

fined Performance Concrete), często jest wynikiem połączenia pożądanych właściwości różnych odmian betonów nowej generacji, co zapewnia optymalne zrównoważenie użyteczności i trwałości konstrukcji. Należy się jednak liczyć z pewnym niebezpieczeństwem, które wynikać może z połączenia różnych składników, bardzo często zaawansowanych chemicznie, w nową mieszankę, która początkowo będzie spełniać wszystkie założone kryteria, jednakże z czasem okaże się, że wykorzystane składniki nie do końca są kompatybilne ze sobą. Jak już wcześniej nadmieniono, każdy proces tworzenia konstrukcji, nie tylko mostowej, obarczony jest niepewnością, wynikającą z niemożności przewidzenia wszystkich oddziaływań pojawiających się w szerokiej perspektywie czasowej. Istnieje wobec tego uzasadniona konieczność wypracowania i stosowania odpowiednich procedur badawczych, które pozwoliłyby w wiarygodny sposób wnioskować o rzeczywistej trwałości zaawansowanych kompozytów betonopodobnych.

LITERATURA

- [1] Ajdukiewicz A., 2007. Konstrukcje betonowe projektowane na okres użytkowania – badania i nowe ujęcia normatywne. [W:] Problemy naukowo-badawcze budownictwa. Tom II – Konstrukcje budowlane i inżynierskie, Wydawnictwo Politechniki Białostockiej.
- [2] Eurokod 0 – Podstawy projektowania konstrukcji.
- [3] Eurokod 2 – Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [4] Eurokod 2 – Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 2: Mosty z betonu – Obliczenia i reguły konstrukcyjne.
- [5] Furtak K., Śliwiński J., 2004. Materiały budowlane w mostownictwie. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności Sp. z o.o. Warszawa.
- [6] Gawron M., Selejdak J., 2014. Analysis of selection the cross-section in relation to span of constructional elements reinforced concrete bridges. [W:] Toyotarity. Management of technology. Aeternitas Publishing House Alba Iulia.
- [7] Madej A., Wołowicki W., 2002. Mosty betonowe wymiarowanie i konstruowanie. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności Sp. z o.o. Warszawa.
- [8] Materiały dostępne: <http://bluebox.ippt.pan.pl/~mglinic/ekomost07.pdf> z dn. 03-01-2015 r.
- [9] PN-EN 206-1 Beton – Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- [10] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej nr 735 z dn. 30 maja 2000 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich utytułowanie.
- [11] Selejdak J., 2013. Problemy jakościowe w procesie realizacji budowli mostowych. W monografii: Jakościowe i ekologiczne aspekty w technologiach budowlanych. Sekcja Wydawnictw Zarządzania Politechniki Częstochowskiej.
- [12] Wołowicki W., 2002. Trwałość betonowych konstrukcji mostowych. Konferencja „Dni Betonu. Tradycja i nowoczesność”, Szczyrk.
- [13] Woyciechowski P., Adamczewski G., 2014. Kształtowanie trwałości betonowych konstrukcji mostowych. Budownictwo Mostowe Vademecum edycja 2014. Wydawnictwo Polskiej Izby Inżynierów Budownictwa Sp. z o.o. Warszawa.

DURABILITY OF CONCRETE BRIDGES

Summary. Concrete bridge is a field that requires not only a deep knowledge, but also a lot of experience. These facilities must fulfil specific requirements, for example. durability, the materials used in construction, in addition to high strength parameters, should be resistant to aggressive environment in which structures are formed. The paper analyzed the basic problems affecting stability of the structure. Reduced durability, bad choice of materials leads to the need to carry out repairs and reinforcements. Selection of the appropriate design solutions and material presented in the article, may bring us closer to a more durable concrete structures.