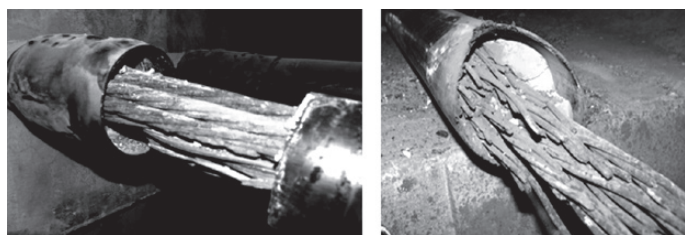
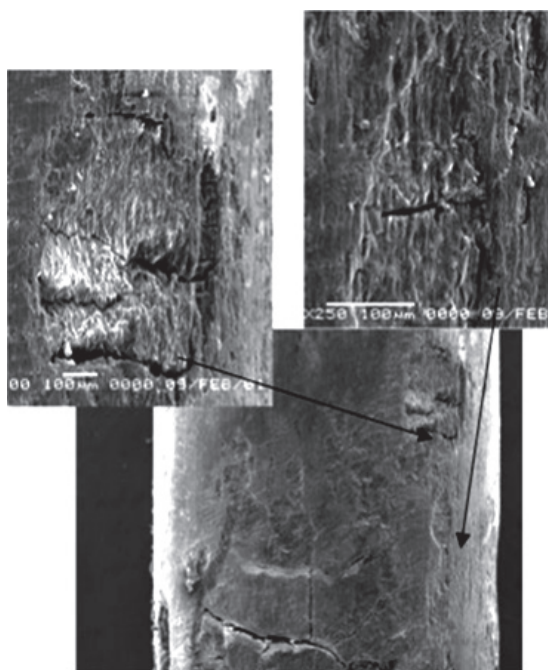


Zagrożenia mostów kablobetonowych powodowane wadliwym iniektem

Główną przyczyną awarii i katastrof mostów kablobetonowych jest korozja cięgien sprężających (rys. 1 i 2). Wraz ze starzeniem się tych mostów, problemy powodowane korozją występują coraz częściej [9]. Obserwuje się to również w Polsce.



Rys. 1. Skorodowane cięgna zewnętrznego kabla sprężającego dźwigary mostu Verina Enon na Florydzie, USA [J.Pouliotte, Department of Transportation State of Florida]

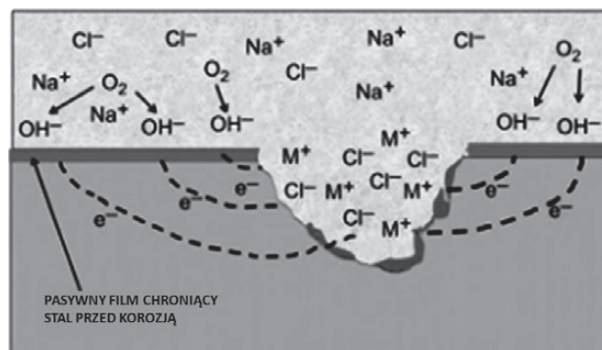


Rys. 2. Uszkodzenie stali sprężającej wywołanej korozją szczelinową [E. Proverbio, L.M. Bonaccorsi, Uniwersytet w Mesynie, Włochy, Internet]

Korozja cięgien w obiekcie mostowym zależy od jego rozwiązania projektowego, technologii wykonania, cech wbudowanych materiałów oraz od środowiska, w którym most jest użytkowany. Problemy korozji cięgien sprężających są generalnie podobne do problemów korozji prętów zbrojenia żelbetu, ale następstwa konstrukcyjne ubytku przekroju cięgna sprężającego wskutek korozji są znacznie groźniejsze. Korozję cięgien sprężających mogą potęgować: nieprzestrzeganie zasad technologii, siła rozciągająca cięgna, korozja naprężeniowa i kruchość wodorowa

stali, defekty iniektu cementowego oraz nieszczelności kanałów kabli i styków segmentów konstrukcji.

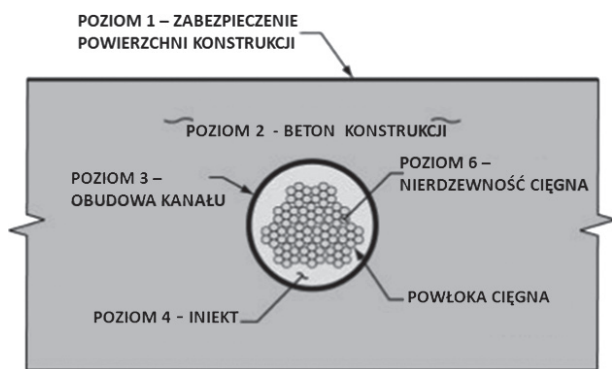
Cięgna stalowe przed umieszczeniem w kanałach kabli bywają w czasie transportu i składowania wystawione na działanie wilgoci i innych szkodliwych czynników. Może to powodować wżery korozyjne, które doprowadzają do przerwania cięgien w czasie ich napinania i/lub użytkowania mostu. W środowisku wilgotnym i morskim iniekcja kanałów kabli po napięciu cięgien powinna być wykonana w ciągu 7 dni (w środowisku suchym może to być 20 do 40 dni). Czas ten można wydłużyć, stosując dodatkowe środki ochrony cięgien przed korozją. Jeżeli na czas oczekiwania na iniekcję wloty do kanałów kabli nie zostaną uszczelnione, to może w nie napłynąć woda, która wywoła korozję cięgien. Aktywność korozji, nawet przy nieco podwyższonym pH środowiska cięgien, mogą zwiększyć agresywne jony (np. chlorkowe i siarczanowe) oraz nasycenie dwutlenkiem węgla wody infiltrującej w kanały kabli. Schemat elektrochemicznego procesu korozji wżerowej pasywowanej stali cięgien powodowanej chlorkami zilustrowano na rys. 3.



Rys. 3. Schemat elektrochemicznego procesu korozji wżerowej pasywowanego metalu powodowanej chlorkami [Hansson C.M.: The Impact of Corrosion on Society. The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International 2011]

Jest możliwych sześć „poziomów” zabezpieczenia cięgien sprężających przed korozją (rys. 4):

- 1 – powierzchnia zewnętrzna konstrukcji sprężonej;** odpowiednio uszczelniona chroni cięgna przed przenikaniem do nich czynników atmosferycznych i zanieczyszczeń; uszczelnieniami są powłoki i membrany na powierzchniach dźwigarów mostów oraz izolacje pomostów;
- 2 – wodoszczelny beton sprężonej konstrukcji;** w prefabrykowanych konstrukcjach segmentowych styki segmentów muszą być uszczelnione żywicą epoksydową;
- 3 – cięgła i szczelna obudowa kanału;** powinna zapewnić skuteczną ochronę cięgien przed kontaktem ze szkodliwymi czynnikami zewnętrznymi;
- 4 – iniekt w kanałach kabli;** powinien być dobrej jakości, wyprodukowany z certyfikowanych składników i stosowany przez certyfikowany personel;



Rys. 4. Poziomy ochrony przed korozją cięgien sprężających beton [Corven, Moreton: Multi-level corrosion protection of steel strands in tendons, 2013 – Internet]

5 – antykorozyjna powłoka cięgien; bywa z żywicy epoksydowej; dotychczas brak doświadczenia ze stosowaniem powleczonych cięgien w dużych kablach konstrukcji mostowych; istnieje obawa, że powłoka może zostać uszkodzona w czasie instalowania i napinania kabla; koszt cięgien w powłoce epoksydowanej jest około 3,5-krotnie większy niż bez niej;

6 – nierdzewność stali cięgien; cechy mechaniczne cięgien z takiej stali są nieco gorsze niż ze zwykłej stali sprężającej; koszt cięgna nierdzewnego jest około 10-krotnie większy, a cięgna pokrytego warstwą nierdzewną 5-krotnie większy niż cięgna ze zwykłej stali dużej wytrzymałości.

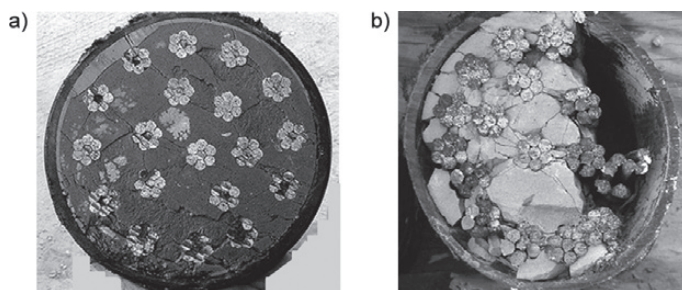
W systemie zabezpieczenia cięgien przed korozją szczególną rolę spełnia iniekt. Liczne badania przeprowadzone w wielu krajach wskazują, że **iniekt – będąc pozornie drugorzędny elementem konstrukcyjnego systemu kablabetonu – ma decydujący wpływ na trwałość i bezpieczeństwo mostów kablabetonowych.**

Iniekt

Celem stosowania iniektu cementowego wypełniającego kanał kablowy jest zabezpieczenie cięgien sprężających przed korozją oraz – w przypadku kabli wewnętrznych – ich zespolenie z betonem konstrukcji mostu. Iniekt powinien chronić cięgna przed wilgocią i szkodliwymi czynnikami z otoczenia obiektu mostowego oraz tworzyć wokół cięgien środowisko alkaliczne, a zespolenie iniektu z betonem konstrukcji umożliwia redystrybucję sił pomiędzy drutami cięgna w przypadkach ich pęknięcia. Wadliwy iniekt nie chroni cięgien przed korozją i nie zapewnia redystrybucji obciążeń drutów. Przekroje kabla z poprawnym i wadliwym iniektem są pokazane na rys. 5.

• **Czynniki ograniczające pożądane działania iniektu.** Zdolność iniektu do ochrony cięgien przed korozją ograniczają lub likwidują napływające w nieszczelne kanały kabli: woda, chlorki, siarczany, dwutlenek węgla i wodór oraz słabe natlenienie iniektu.

Woda jest groźna, gdyż w kanały może przynosić do cięgien jony chlorkowe i inne agresywne związki chemiczne. W wodzie porowej cementu są obecne siarczany. Woda może spowodować korozję cięgien nawet, gdy naturalna zawartość w iniekcie chlorków jest stosunkowo niewielka i wynosi około 500 ppm (parts per milion – części na milion). Warstwa wilgoci na powierzchni stali może stanowić elektrolit dla reakcji elektrochemicznych. Utrzymywanie się tej warstwy zależy od wilgoci, temperatury i agresywnych zanieczyszczeń w kanale kabla. Znaczna korozja występuje



Rys. 5. Przekroje poprzeczne kabli sprężających: a) z kanałem prawidłowo wypełnionym iniektem (ale w iniekcie są widoczne mikropęknięcia, prawdopodobnie skurczowe, oraz skorodowane cięgna, co może świadczyć o tym, że albo iniekt zawiera czynniki aktywizujące korozję, albo cięgna zaczęły korodować przed wykonaniem iniekcji), b) z wadliwym iniektem: spękany z pustkami powietrznymi oraz skorodowanymi cięgnami [Internet]

przy wilgotności powyżej 75% i zależy od stopnia zanieczyszczenia powierzchni cięgien [13]. Dlatego higroskopijne sole, takie jak chlorki sodu, mogą sprzyjać kondensacji wody z powietrza przy mniejszej wilgotności względnej niż w warunkach braku zanieczyszczeń. A to wydłuża czas działania wilgoci i powoduje rozwój korozji. Również zanieczyszczenie powierzchni stali chlorkami i siarczanami może spowodować zwiększony rozwój korozji wskutek tworzenia się na cięgnach powłoki i jej produktów.

W suchych kanałach rozwój korozji cięgien bywa niewielki lub w ogóle korozja nie występuje. Gdy jednak w suchym kanale pojawi się wilgoć, np. w postaci resztek wody porowej lub wskutek infiltracji wody przez nieszczelności kanału, wówczas korozja cięgien w pustkach i w warstwach kontaktu iniektu z powietrzem może się uaktywnić [8]. Ponadto produkty korozji (które bywają higroskopijne) umożliwiają kondensację wilgoci nawet przy niskich wartościach wilgotności względnej.

Dwutlenek węgla zawarty w powietrzu, przenikając w powierzchnię międzyfazową iniekt – pustka w kanale, wywołuje karbonizację iniektu. Nawet umiarkowana karbonizacja, przy okresowych infiltracjach wody w kanały, aktywizuje korozję cięgien. Zmniejsza bowiem alkaliczność powierzchni kontaktu iniekt – pustka; odczyn pH może w tej powierzchni zmniejszyć się do 8 [8]. Stwarza to warunki sprzyjające rozwojowi korozji.

Nawet śladowe ilości chlorków w wodzie mogą z ich dopuszczalną ilością w iniekcie utworzyć zbiór jonów chlorkowych aktywizujący korozję stali nawet, gdy woda porowa iniektu jest alkaliczna (o pH > 12) [16]. Zwiększona zawartość chlorków w powierzchni międzyfazowej iniekt – pustka w połączeniu z jego karbonizacją stwarza warunki, w których następuje zanik pasywacji stali cięgien.

Duże zagrożenie cięgien korozją stwarzają sole. Sól stosowana do zwalczania śliskości zimowej dróg dostaje się do wnętrza kanałów kabli z wodą spływającą z pomostu, infiltrującą w kanały przez nieszczelności ich obudowy (stąd ważność 1. „poziomu” ochrony cięgien). Zanieczyszczenia higroskopijnymi solami chlorkowymi powodują kondensację pary wodnej z powietrza, zwiększając czas działania wilgoci na cięgna i rozwój ich korozji.

Groźne są zanieczyszczenia powierzchni cięgien chlorkami i siarczanami, ponieważ produkty wywołanej nimi korozji tworzą na cięgnach agresywne filmy potęgujące korozję.

Siarczany w iniekcie mogą osłabiać pasywację stali, gdy reagują z zawartym w cemencie tlenkiem glinu, tworząc agresywne związki nierozpuszczalne [6].

Duży wpływ na rozwój korozji stali w roztworze siarczanu alkalicznego ma pH roztworu. W silnie alkalicznym roztworze (pH = 13) jony siarczanowe nie osłabiają rozwoju i stabilności pasywnego filmu na cięgnach. Natomiast siarczan w roztworze alkalicznym o pH ≤ 12,6 może osłabiać rozwój pasywacji stali. Cięgna pokryte niestabilnym filmem pasywnym w roztworze siarczanu alkalicznego ulegają korozji wżerowej.

W iniektach zawierających podwyższoną ilość siarczanów nawet niewielki wzrost ilości jonów chlorkowych zwiększa prądy korozyjne w stali cięgien i przyspiesza ich niszczenie.

W nasyconym roztworze wodorotlenku wapnia (pH ≈ 12,1), przy stężeniu siarczanu sodu powyżej 0,2%, może wystąpić zanik pasywacji stali [5]. Również siarczan potasu w nasyconym roztworze wodorotlenku wapnia hamuje tworzenie na stali pasywnego filmu. W roztworze wodorotlenku wapnia w obecności siarczanu sodu występuje w stali zwiększony prąd korozji [1].

Warunki do rozwoju korozji stwarza także małe utlenienie iniektu, będące rezultatem ograniczonej ilości tlenu w kanale i wysoka alkaliczność wody porowej iniektu (pH > 14), które umożliwiają stabilność jonu HFeO_2^- [2].

Przy zawansowanej segregacji iniektu kinetyka korozji w roztworach siarczanu alkalicznego powoduje sprzężenie makrokomórkowe, które może doprowadzić do niekorzystnego sprzężenia galwanicznego przyspieszającego korozję.

Warunki umożliwiające korozję stali stwarzają również: małe natlenienie iniektu i wysoka alkaliczność jego wody porowej (pH > 14) [2]. Korozję aktywizują reakcje hydrolyzy z udziałem jonów siarczanowych, takie jak $\text{Fe}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2 + 2\text{H}_2\text{SO}_4$ [11]. Obecność siarczanów w iniektach może powodować w roztworze wodorotlenku wapnia o pH ≈ 12 zahamowanie tworzenia się na stali warstwy pasywnej lub jej zanik oraz zwiększenie prądu korozji [1, 5].

Miejscami szczególnego zagrożenia cięgien korozją są strefy zakotwienia kabli. Te strefy zawierają elementy z różnych metali. Stwarza to warunki do interakcji galwanicznych pomiędzy cięgnami i kotwiącymi je elementami. Mogą występować niekorzystne prądy makrokomórkowe, potęgujące korozję cięgien. Taki mechanizm pogorszenia stanu cięgien w strefach ich zakotwienia może doprowadzić do awarii po zaledwie kilku latach użytkowania mostu [16].

• **Defekty iniektu.** Defektami iniektu są: rozsegregowane składniki, niesydratyzowany cement, wilgoć, mała gęstość, plastyczność, pustki i zawartość agresywnych czynników chemicznych. Szkodliwymi czynnikami chemicznymi są jony chlorkowe Cl^- , gdy ich stężenie przekracza 0,08%, oraz jony siarczanowe SO_4^{2-} , przy stężeniu przekraczającym 0,2% ciężaru cementu w iniektach oraz dwutlenek węgla. Zdarzają się jednak przypadki korozji cięgien w iniektach przy mniejszych stężeniach jonów niż te graniczne. Obecność jonów powoduje depasywację stali i/lub zmniejszenie rezystywności iniektu.

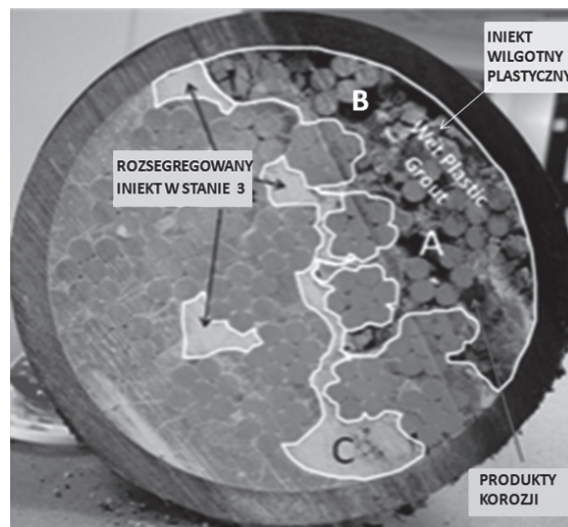
Badania stanu kabli w użytkowanych mostach wykazują występowanie w ich kanałach iniektu:

- 1 – rozsegregowanego mokrego, o konsystencji plastycznej,
- 2 – rozsegregowanego wilgotnego z czarnymi prążkowanymi przewarstwieniami,
- 3 – rozsegregowanego suchego, przypominającego białą kredową pastę lub pył (rys. 6),
- 4 – stwardniałego, szarego, suchego.



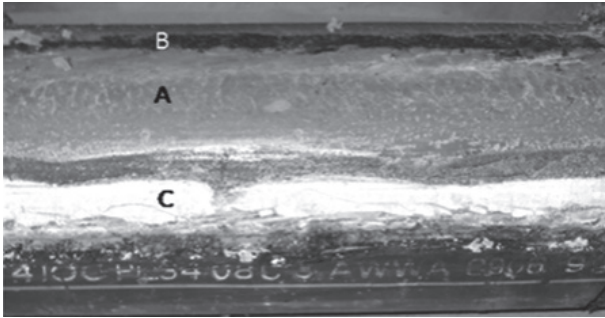
Rys. 6. Stan iniektu w zewnętrznym kablu sprężającym most Ringling Causeway na Florydzie – w ramce obszar, w którym pH iniektu jest w zakresie 8,2÷12,0; z prawej u góry widać śrubokręt wciśnięty w miękki iniekt (FHWA-HRT-14-039, May 2014)

W niektórych kablach znajdowano iniekt w tych wszystkich czterech stanach. Iniekt w stanie 4., jedyny chroniący cięgna przed korozją, występował w dolnych częściach kanałów, natomiast iniekt w stanach 1. i 2. – były głównie w najwyższych odcinkach kabli. Świadczy to o tym, że segregację iniektu powodują siły grawitacji. Odcinki z rozsegregowanym iniektem często zawierały pustki powietrzne wzdłuż górnej części kanału kabla. Przykład przekroju kabla z wykrytym wadliwym iniektem pokazano na rys. 7 [21]. Część cięgien styka się w nim z górną prawą ćwiartką wewnętrznej powierzchni obudowy kanału i jest otoczona iniekt w stanie 1. (A). Najwyższe z tych cięgien jest w pustce powietrznej (B). Iniekt w stanie 4., szary, wypełnia pozostałą część przekroju kanału, występuje w nim i otacza warstwa grubości około 1 mm iniektu w stanie 3. (C), który jest obrysowany białą linią. Rozdziela ona iniekt w stanie 4. od rozsegregowanego miękkiego, mokrego i od pustki powietrznej. Iniekt w stanie 2. (niewidoczny na fotografii) został zidentyfikowany jako pył krzemionkowy, niezmięszany i nierozsegregowany. Występowanie trzech niepożądanych stanów iniektu wzdłuż górnych poziomych odcinków kabli, w pobliżu szczytów ich tras i w zakotwieniach, świadczy o tym, że segregację iniektu wywołała grawitacja. Chociaż widać to słabo na fotografii, to do cięgien w wadliwym iniektach przylegają produkty ich korozji. Fotografia iniektu wzdłuż kabla według rys. 7, wykonana



Rys. 7. Poprzeczny przekrój kabla z wadliwym iniektem [21]

z prawej strony po usunięciu obudowy kanału, jest przedstawiona na rys. 8. Widać iniekt w trzech stanach: A – rozsegregowany mokry, miękki (w stanie 1.), B – czarny rozsegregowany (w stanie 2.) oraz pustkę powietrzną, C – rozsegregowany, kredowobiały (w stanie 3.).



Rys. 8. Widok iniektu z prawej strony kabla z rys. 6 po usunięciu obudowy kanału [21]

W niektórych miejscach zbadanych kabli swobodna woda zgromadzona w górnych częściach ich przekrojów oraz w odcinkach wysoko położonych zawierała duże stężenia jonów korozyjnych (Cl^- i SO_4^{2-}), aktywizujących korozję cięgien.

Największe stężenia jonów Cl^- stwierdzano w górnych częściach poprzecznych przekrojów kanałów. Wskazuje to na fakt, że migracja tych jonów w górę występowała w czasie wiązania iniektu.

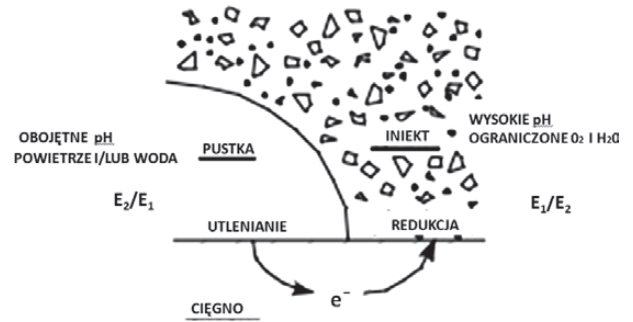
Korozja cięgien, odkryta w stosunkowo krótkim czasie po zbudowaniu mostów, wystąpiła również w miejscach, w których stężenia jonów Cl^- były stosunkowo małe, poniżej granicznych 0,08% ciężaru cementu. Uznano, że w tych miejscach głównymi powodami korozji były: osiadania i segregacja iniektu oraz niecałkowite wypełnienie nim kanałów kabli.

Defekty iniektu są rezultatem wadliwych materiałów użytych do jego wyprodukowania, nieodpowiedniego zmieszania składników iniektu, nieodpowiedniej konsystencji iniektu w czasie włączania go w kanały i niewłaściwej technologii włączania (iniekcji). Wskutek defektów iniektu cięgna są narażone na uszkodzenia przez korozję.

Rozsegregowany iniekt zwykle charakteryzuje się dużą wilgotnością (około 80%), dużym stężeniem wolnego siarczanu i małą zawartością chlorku. Pomimo wysokiego pH wody porowej iniektu (przekraczającego 12÷13) istnieją warunki do silnej korozji cięgien. Z rozsegregowanym iniektem jest związane duże stężenie jonów siarczanowych [12 ÷ 14], które mogą wywołać rozwój korozji cięgien. Natomiast w spękanym iniekcie reakcje hydrolizy z udziałem jonów siarczanowych, takie jak $\text{Fe}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2 + 2\text{H}_2\text{SO}_4$ powodują lokalną korozję stali [11].

Największa fizyczna i chemiczna degradacja iniektu występuje w górnych odcinkach tras kabli, gdy gromadząca się tam woda zawiera jony agresywnych czynników chemicznych.

Szczególne zagrożenie cięgien korozją stwarzają pustki w kanałach odsłaniające odcinki cięgien oraz infiltracja w kanały wody wywołującej reakcje elektrochemiczne. Badania wykazały, że **największa korozja cięgien występuje w strefach kontaktu cięgno – iniekt – pustka powietrzna** (rys. 9). W każdej z tych stref powierzchnia cięgna ma inny potencjał elektryczny [15]. Korozję przy-

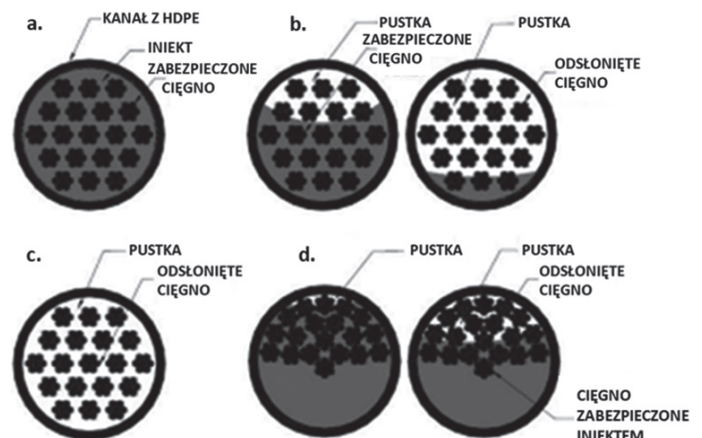


Rys. 9. Reakcje elektrochemiczne w powierzchni kontaktu pustka/iniekt [NCHRP 14-28]

spiesza prąd makrokomórkowy przepływający pomiędzy obszarem anodowym, jakim jest powierzchnia kontaktu iniektu z powietrzem i katodową masą iniektu.

• **Pustki w iniekcie** (rys. 10). Najczęstszą przyczyną powstawania pustek jest grawitacyjne wydzielanie z iniektu wody (bleeding). Przyczynami bywają również: zła konsystencja i segregacja iniektu, zatkanie nim kanału kabla w czasie iniekcji, uwięzienie powietrza spowodowane nieodpowiednim odpowietrzeniem kanału, niecałkowite wypełnienie go iniektem, docisk cięgien do ściany kanału oraz kombinacja tych przyczyn. Pustki bywają wypełnione powietrzem, infiltrującą z zewnątrz kanału wodą lub powietrzem i wodą. Pustki mogą być również rezultatem wykonania iniektu z nieodpowiednich materiałów, złego ich zmieszania, niewłaściwej iniekcji (zbyt małego jej ciśnienia, niekompletnego wypełnienia kanału, wycieków z niego iniektu, niewystarczającej ilości iniektu wylanego w czasie iniekcji przez otwory odpowietrzające kanał), temperatury, kształtu trasy kanału oraz odstępów pomiędzy cięgnami [4]. Towarzyszący iniekcji ruch w kanale powietrza i wody może pozostawić w iniekcie pustkę w postaci podłużnej bruzdy. Po związaniu iniektu z upływem czasu woda zanika wskutek odpływu w pory iniektu, wyschnięcia i odparowywania, pozostawiając pustki wypełnione powietrzem. Zimą wydzielona woda może zamarznąć i uszkodzić konstrukcję.

Pustki najczęściej występują na najwyższych położonych odcinkach tras kabli, w których gromadzi się woda wydzielona z iniektu. Do tych miejsc woda jest podciągana także



Rys. 10. Przekroje poprzeczne kabli: a) idealnego (bez pustek), b) w pobliżu strefy zakotwienia (przy końcu belki), c) pionowego w górnej części sprężonego korpusu filara (rezultat sedimentacji iniektu), d) przy dwiutorze zmieniającym trasę kabla oraz w środku długości dźwigara kablobetonowego [NCHRP 14-28]

wąskimi szczelinami pomiędzy cięgnami, działającymi jak kapilary.

Pustki stwarzają zagrożenia cięgien sprężających ponieważ:

– w miejscach pustek nie występuje redystrybucja naprężeń pomiędzy drutami/cięgnami kabla;

– cięgien w pustkach nie chroni przed korozją środowisko alkaliczne (o wysokim pH); są dostępne dla szkodliwych czynników;

– odcinki cięgien w pustkach są w innym środowisku niż otoczone iniektem, co wywołuje korozję galwaniczną; powierzchnia cięgna w pustce ma bowiem inny potencjał elektryczny niż cięgna otoczonego materiałem cementowym (potencjały mogą znacznie się różnić); elektrony metalu przepływają z obszaru o potencjale ujemnym do obszaru o potencjale dodatnim, powodując ubytki korozyjne cięgien;

– w pustkach powstają produkty korozji, które wywołują reakcje anodowe.

Szybkość korozji cięgien związanej z pustkami zależy od cech powierzchni cięgien oraz dostępności wody i powietrza do pustek. Korozję intensyfikuje karbonatyzacja iniektu i zwiększona ilość chlorków.

W strefach zakotwień kabli pustki mogą doprowadzić do zaniku pasywacji cięgien i metalowych elementów zakotwienia. Występuje to w przypadku nieszczelności tych stref. Wtedy w pustki dostaje się powietrze i woda. Nawet umiarkowana karbonizacja iniektu przez CO₂ zawarty w powietrzu i okresowe intruzje wody aktywizują korozję cięgien.

Stwierdzenie istnienia pustki nie zawsze świadczy o silnej korozji cięgien sprężających. Kontrole kabli z suchymi pustkami często nie wykazują korozji cięgien lub stwierdzają tylko niewielki jej rozwój. Jednak zawsze należy traktować pustkę jako miejsce prawdopodobnej korozji cięgien, wymagające szczegółowego skontrolowania. Nawet jeśli w pustce nie zachodzą procesy chemiczne, to są w niej warunki podobne do wystawienia odsłoniętej stali na czynniki atmosferyczne. Pustka stwarza zagrożenie stali wilgocią i zanieczyszczeniami (solą, dwutlenkiem siarki i węgla).

Przy kontrolowaniu stanu kabli sprężających konstrukcję mostu wykrywanie pustek ma ogromne znaczenie, ponieważ w ich miejscach zwykle występuje korozja cięgien. Lokalizacja pustek jest stosunkowo łatwa, natomiast wykrycie korozji cięgien kabla – zwykle trudne i czasochłonne. Znając miejsca pustek, można ograniczyć do nich dokładne badania stanu cięgien metodami nieniszczącymi.

• **Zapobieganie wadliwości iniektu.** Generalnie, należy przestrzegać poprawnych zasad technologii iniekcji kanałów kabli [17, 18]. Współcześnie iniekt jest wytwarzany z cementu portlandzkiego oraz może zawierać żużel wielkopieczowy, pył krzemionkowy, popiół lotny oraz domieszki regulujące czas wiązania, napowietrzające, zapobiegające wydzielaniu wody i hamujące korozję. Nie stosuje się domieszek powodujących pęcznienie, ponieważ zmniejszają trwałość iniektu.

Niżej przedstawiono kilka podstawowych zasad technologii iniekcji zaczerpniętych z zaleceń Komitetu FIP-RILEM ds. iniekcji kabli sprężających:

a) stosunek woda/cement iniektu powinien być możliwie najmniejszy;

b) wydzielanie wody z iniektu w temperaturze +18°C nie powinno przekraczać po 3 h od wymieszania 2%

objętości iniektu (maksymalnie 4%), a wydzielona woda musi zostać wchłonięta w związany iniekt w ciągu 24 h;

c) należy stosować cement portlandzki lub portlandzki wielkopieczowy, niezawierające chlorku wapnia;

d) można stosować dodatki do iniektu, np. zwiększający urabialność, zmniejszający wydzielanie wody, napowietrzający; dodatki nie mogą zawierać chlorków i azotanów; ich działanie należy sprawdzić laboratoryjnie;

e) mieszalnik powinien wytwarzać iniekt o jednolitej konsystencji; wskazane, aby o cechach koloidalnych; czas mieszania iniektu zależy od rodzaju mieszalnika i zwykle wynosi od 2 do 4 min;

f) po wymieszaniu należy iniekt utrzymywać w ciągłym ruchu;

g) przed wtlaczaniem iniektu należy kanał przepłukać wodą; po przepłukaniu należy wodę pozostałą w kanale usunąć sprężonym powietrzem lub w inny sposób;

h) iniekt należy pompować z możliwie najniższym ciśnieniem i nieprzekraczającym 1 MPa; na wlocie do kanału ciśnienie nie powinno przekraczać około 0,5 MPa; czasami początkowo może być konieczne wyższe ciśnienie, aby upłynnić iniekt o cechach tiksotropowych, ale po upłynnieniu ciśnienie pompowania powinno być takie, jak w przypadku zwykłych iniektów;

i) w przypadku bardzo dużych kanałów może być konieczne powtórzenie wtlaczania iniektu, które przeprowadza się po około 2 h.

Jeżeli nie uzyskuje się pełnego zainiektowania kanału kabla, to należy uzupełnić iniekcję przez ostatni otwór wentylacyjny, z którego wypływał iniekt.

Aby zminimalizować narażenie cięgien na działanie środowiska zewnętrznego, w tym wilgoci, soli i atmosferycznego dwutlenku węgla, otwory iniekcyjne i odpowietrzające kanały kabli powinny być wyposażone w zamknięcia używane przed zakończeniem i po zakończeniu iniekcji.

Po 24 h od zakończenia iniekcji (tj. po związaniu iniektu) sprawdza się wypełnienie kanału, w razie potrzeby stosując wiercenie i endoskop. W przypadkach kabli zewnętrznych można wykrywać pustki innymi metodami nieniszczącymi, wykorzystując termografię w podczerwieni, echo uderzenia, sondowanie dźwiękowe.

Problemy jakości wykonania iniekcji powodują rygorystyczne wymagania dotyczące kwalifikacji personelu, który ją przeprowadza, przestrzegania okresu przydatności do stosowania materiału iniekcyjnego oraz przeprowadzania prób iniekcji na makietach polowych.

Po stwierdzeniu w USA, że przyczyną większości awarii i katastrof mostów kablobetonowych jest niewłaściwy iniekt, Federalna Administracja Drogowa (FHWA) od 2001 r. wymaga stosowania iniektów tiksotropowych, wytwarzanych z materiałów paczkowanych (prepackaged), dostarczanych przez atestowanych producentów. Iniekt te wydzielają małą ilość wody. W rezultacie uzyskano znaczące zmniejszenie liczby przypadków korozji cięgien. Jednak okazało się, że również przy stosowaniu iniektów paczkowanych zdarza się korozja cięgien.

Współcześnie rozważa się wprowadzenie kabli niespolonych z konstrukcją betonową, zabezpieczonych przed korozją wypełniaczami takimi, jak uretany oraz stabilne, obojętne chemicznie woski i smary z ropy naftowej, z dodatkiem inhibitorów korozji. Ten rodzaj wypełniaczy ułatwia zarówno wymianę wypełnienia kanałów, jak i uszkodzonych cięgien. Za stosowaniem takich wypełniaczy przemawia zadowalające używanie ich w przemyśle

jądrowym i pozytywne wyniki obserwacji w kilku mostach doświadczalnych. Europejska Organizacja ds. Aprobatach Technicznych ETAG 013 (2012) dopuszcza ochronę cięgien sprężających woskami bitumicznymi oraz smarami na bazie ropy naftowej. Wymaga, aby spełniały kryteria stabilności, separacji, penetracji, zawartości agresywnych jonów i ochrony przed korozją. Wosk i smar ma zapewniać ochronę przed korozją przez hermetyzację stali sprężającej oraz działanie jako bariera fizyczna. W przeciwieństwie do iniektu cementowego, smar i wosk nie muszą zmniejszać korozji, ale stanowią osłonę przed czynnikami, które ją powodują. Normy europejskie wymagają określenia korozyjności wosku badaniami korozji taśmy miedzianej w temperaturze 100°C oraz smaru – badaniami Emcor. Obawy związane z zachowaniem się cięgien niezespólnych z konstrukcją betonową, zabezpieczonych zgodnie z zasadami iniekcji wypełniaczami z wosków i smarów, a także obawy związane z trwałością mostów z takimi wypełniaczami nie zostały jeszcze rozwiane, aby rozpoznać tę technikę.

• **Iniekcja próżniowa.** Ta iniekcja zwiększa skuteczność wypełniania kanałów kabli iniektem. Najpierw pompą próżniową zainstalowaną przy jednym końcu kanału usuwa z niego powietrze przez zainstalowany w jego wylocie zawór czterodrożny – do uzyskania przy drugim końcu kanału podciśnienia około 0,1 kPa. Następnie po obrocie zaworu włącza się iniekt w kanał. Podciśnienie jest utrzymywane do czasu wypełnienia całego kanału iniektem i doprowadzenia jego ciśnienia do około 0,7 MPa. Iniekcja próżniowa jest stosowana zarówno do wypełniania kanałów kabli, jak i do likwidacji pustek. Eliminuje w iniektach pęcherzyki powietrza, przez co zmniejsza powstawanie pustek powodowanych wydzieleniem wody. Proces iniekcji próżniowej jest szybki i skuteczny. Wymaga dobrego uszczelnienia kanału, aby umożliwić uzyskanie odpowiedniego ciśnienia iniekcji, koniecznego do wypełnienia iniektem całego kanału.

• **Wypełnianie wykrytych pustek.** Obejmuje ono następujące czynności: wywiercenie otworu do pustki, zmierzenie jej objętości i wypełnienie pustki materiałem naprawczym. Podstawowym wymaganie jest kompatybilność cech materiału wypełniającego z cechami iniektu, który otacza pustkę. Niespełnienie tego warunku zwiększa intensywność korozji cięgien – naprawa zamiast zahamować, zwiększa korozję. Aby tego uniknąć, wypełniacz pustek nie powinien reagować z iniektem w kanale kabla, gdyż intensyfikuje to korozję cięgien.

Objętość pustki mierzy się, określając objętość powietrza wyssanego z pustki do możliwie najniższego podciśnienia. Pomiar wykonuje się dwukrotnie, po wpompowaniu w pustkę powietrza. Wyniki obu pomiarów powinny być bardzo bliskie. Gdy nie są – powtarza się pomiar. Jeśli nie można osiągnąć w pustce podciśnienia, to należy wysysanie powietrza przerwać i pustkę uszczelnić. Zmierzenie objętości pustki umożliwia ocenę, czy wprowadzony w nią wypełniacz całkowicie ją zlikwidował. Gdy objętość włożonego wypełniacza jest mniejsza niż objętość pustki, to włączanie należy powtórzyć.

Pustki należy wypełniać, stosując iniekcję próżniową. Rurki wlotową i wylotową wkleja się zaprawą epoksydową w otwory wywiercone do pustki. Tą zaprawą wypełnia się bezzwłocznie także wywiercone otwory, które nie trafiły w pustkę. Wypełniacz wpompowuje się w pustkę, stosując

ciśnienie 0,5 kPa. Takie ciśnienie utrzymuje się przez 1 min po zakończeniu pompowania. Następnie zmniejsza je do 0,2 kPa i utrzymuje do czasu związania wypełniacza.

Obawy związane z rozwojem korozji cięgien po wypełnieniu pustek w kanałach kabli nieodpowiednim materiałem są szczególnie uzasadnione, gdy kabel zawiera wadliwy iniekt. Przykładem jest most Varina-Enon w Wirginii, USA. W tym moście przed upływem 4 lat po wypełnieniu pustek wystąpiły korozyjne pęknięcia cięgien [7]. W zasadzie wypełnienie pustek nie spowoduje rozwoju korozji, gdy: przed ich wypełnieniem zostanie z kanału usunięty iniekt, który uległ degradacji, pustki zostaną całkowicie wypełnione materiałem naprawczym kompatybilnym z iniektem w kanale, iniekt w kanale i materiał naprawczy wypełniający pustki będzie cechowała duża wartość pH, przy której stal cięgien zachowa pasywność.

Problemem jest usuwanie wadliwego iniektu przed wprowadzeniem do kanału materiału wypełniającego. Do tego stosuje się lancę wodną działającą z bardzo dużym ciśnieniem. Po zakończeniu wypłukiwania wadliwego iniektu kanał należy osuszyć. Ostatnio badano techniki suszenia połączone z impregnacją cięgien inhibitorami.

• **Kontrola stanu kabli sprężających.** Generalnie metody kontroli stanu kabli są dzielone na niszczące i nieniszczące (NDE/NDT – Non-Destructive Evaluation/Testing). Niszczące polegają na wizualnym sprawdzaniu elementów kabla po usunięciu otuliny betonowej (w przypadku kabli wewnętrznych), obudowy kanału i iniektu oraz pobraniu do badań laboratoryjnych jego próbek. Powoduje to lokalne uszkodzenia konstrukcji. Dlatego są preferowane badania nieniszczące, które nie ingerują w konstrukcję. Nieniszczącą ocenę stanu kabli sprężających konstrukcje mostowe umożliwiają:

- kontrola wizualna z użyciem boroskopu;
- kontrola penetrantami;
- termografia podczerwieni (pasywna i aktywna);
- metody elektromagnetyczne: georadar; radiografia; metoda sprężysto-magnetyczna; elektryczna tomografia pojemnościowa;
- metody magnetyczne: wycieku strumienia magnetycznego, aktywnego i rezidualnego; indukowanego pola magnetycznego; mikromagnetyczna; czujników magnetystrykcyjnych;
- metody fali mechanicznej i wibracji: kontrola dźwiękowa; metoda echa uderzenia; metoda emisji akustycznej; metoda prędkości impulsu dźwiękowego/ultradźwiękowego; metoda echa ultradźwięków; tomografia ultradźwiękowa; metoda ultradźwięków małej częstotliwości; metoda ultradźwięków ukierunkowanych; techniki wibracyjne (ogólnej reakcji na drgania, wibrometria), fotogrametria/kontrola wideo;
- metody elektrochemiczne: potencjału półogniwa; liniowej rezystancji polaryzacyjnej; szumu elektrochemicznego; elektrochemicznej spektroskopii impedancyjnej;
- metody czujników: reflektometria w dziedzinie czasu; optyczna reflektometria w dziedzinie czasu; metoda czujników bezprzewodowych („Smart Pebble” – wykrywających w betonie chlorki oraz wbudowanych w kable, wykrywających korozję cięgien); metoda czujników światłowodowych z siatką: długookresową i Braga; metoda zewnętrznego interferometru *Fabry-Perota* oraz metoda tensometrów strunowych;
- metody przepływu powietrza;
- pomiar sił w kablach.

Charakterystykę wymienionych metod zawiera artykuł autora [10].

Pustki i inne wady iniektu oraz wodę w kanałach kabli zewnętrznych wykrywają georadar, tomografia podczerwieni i elektryczna tomografia pojemnościowa, a w kanałach wewnętrznych – georadar, tomografia podczerwieni, tomografia ultradźwiękowa oraz metoda echa uderzenia (z małą dokładnością).

• **Perspektywy poprawy cech iniektu.** Nowe możliwości ograniczenia wad iniektów cementowych stwarzają nanomodifikatory. Są to nanorurki węglowe i tytanianowe. Zdypergowane energią ultradźwięków w paście z cementu portlandzkiego zwiększają jej płynność i zdolność wnikania w bardzo niewielkie przestrzenie. Polepszają hydratację cementu i ułatwiają uwalnianie gazów z pasty w czasie jej wiązania, co zmniejsza porowatość spoiwa cementowego. Zwiększają jego wytrzymałość i moduł *Younga*.

Nanorurki są jedno- i wielościennie. Węglowe mają średnicę w zakresie $1\div 100$ nm, tytanianowe dostępne na rynku – średnicę zewnętrzną $11 \pm 1,9$ nm, wewnętrzną $5 \pm 0,8$ nm, długość 100 ± 36 nm, pole powierzchni około 200 m²/g [20].

Nanorurki węglowe są wykonane ze zwiniętego grafenu (ma wytrzymałość 200-krotnie większą niż stal). Dodane w ilości 0,16% (wagowo) masy cementu przy właściwym rozproszeniu zwiększają 14-dniową wytrzymałość stwardniałego spoiwa cementowego na ściskanie o ponad 30% i na zginanie o ponad 50% [19]. Główną wadą nanorurek węglowych jest trudność rozproszenia ich w matrycy cementowej, a przy niewystarczającej dyspersji mogą szkodliwie wpływać na cechy spoiwa cementowego [20]. Natomiast nanorurki tytanianowe łatwiej rozproszyć; ich dodatek 0,5% (wagowo) w stosunku do cementu zwiększa 28-dniową wytrzymałość spoiwa cementowego na ściskanie o około 11% i na zginanie około o 23% [20].

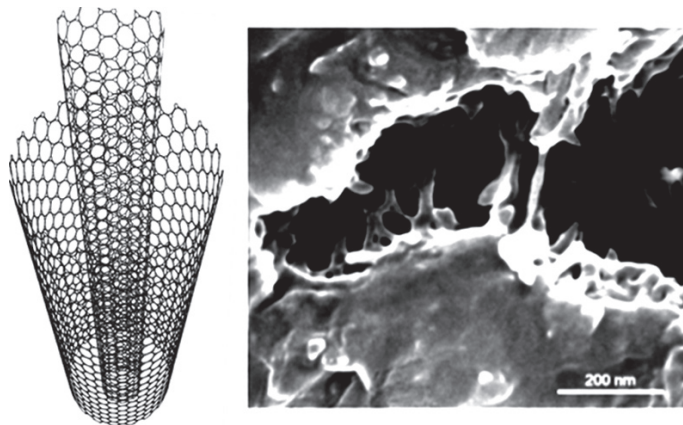
Analiza obrazów spoiwa cementowego z nanorurkami tytanianowymi, uzyskanych elektronowym mikroskopem skaningowym (EMS) wykazała, że wypełniają w spoiwie pustki, szczeliny i pory wielkości $10\div 100$ nm. Zagęszczają to mikrostrukturę spoiwa, łagodzą i zmniejsza propagację w nim pęknięć. Nanorurki przenoszą siły wewnętrzne przez mikropustki i mikropęknięcia spoiwa [20]. Obraz stwardniałego cementu z nanorurkami tytanianowymi wykonany EMS pokazano na rys. 11.

* * *

Od redakcji. Niniejszy artykuł został opublikowany w nr. 9/2019 miesięcznika „Drogownictwo”. W „Inżynierii i Budownictwie” zamieszczamy go po uzyskaniu zgody redakcji tego miesięcznika, za którą dziękujemy, oraz po wprowadzeniu niewielkich uzupełnień przez Autora. Wyrażamy nadzieję, że publikacja zainteresuje naszych Czytelników.

PIŚMIENICTWO

- [1] *Al-Tayyib A.J., Somuah S.K., Boah J.K., Leblanc P., Al-Mana A.I.*: Laboratory study on the effect of sulfate ions on rebar corrosion. „Cement and Concrete Research”, 18, 1988.
- [2] *Bertolini L., Carsana M.*: High pH Corrosion of Prestressing Steel in Segregated Grout. Modeling of Corroding Concrete Structures. Springer, RILEM Bookseries, 2011.



Rys. 11. Struktura dwuściennej nanorurki węglowej (z grafenu) oraz obraz mikropustki w spoiwie cementowym zawierającym nanorurki tytanianowe, uzyskany elektronowym mikroskopem skaningowym [20]

- [3] *Carsana M., Bertolini L.*: Corrosion failure of post-tensioning tendons in alkaline and chloride-free segregated grout: a case study. Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance (3), 2015.
- [4] *Goodwin F.E.*: Corrosion in bonded post-tensioned structures. Materials Performance 41, October 2002.
- [5] *Gouda V.K.*: Corrosion and corrosion inhibition of reinforcing steel: I. Immersed in alkaline solution. „British Corrosion Journal”, Vol. 5, 1970.
- [6] *Gouda V.K., Halaka W.Y.*: Corrosion and Corrosion Inhibition of Reinforcing Steel: II. Embedded in Concrete. „British Corrosion Journal”, Vol. 5, 1970.
- [7] *Hansen B.*: Forensic engineering: Tendon failure raises questions about grout in post-tensioned bridges. „Civil Engineering. News”, 17–18 2007.
- [8] *Hartt W., Venugopalan S.*: Corrosion Evaluation of Post-Tensioned Tendons on the Mid Bay Bridge in Destin, Florida. Final Report to Florida Department of Transportation, April 2002.
- [9] *Jarominiak A.*: Zagrożenia cięgien sprężających w mostach kablobetonowych. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 10/2019.
- [10] *Jarominiak A.*: Nieniszczące metody kontroli stanu kabli mostów kablobetonowych i podwieszonych. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 11/2019.
- [11] *Jones D.A.*: Principles and Prevention of Corrosion. 2nd Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, 1996.
- [12] *Lau K., Lasa I., Paredes M.*: Corrosion Failure of Post-Tensioned Tendons in Presence of Deficient Grout. Paper No. 2600. CORROSION/2013.
- [13] *Matsushima I.*: Uhlig's Corrosion Handbook. John Wiley & Sons, Inc. 2011 (publikacja zbiorowa).
- [14] *Merril B.*: Memorandum. Grout Testing and Analysis. Texas Department of Transportation, September 14, 2010.
- [15] *Trejo D., Pillai R., Hueste M.B.D., Reinschmi K.F.*: Parameters Influencing Corrosion and Tension Capacity of Post-Tensioning Strands. „Aci Materials Journal”, 106(2). March 2009.
- [16] *Wang H., Sagüés A.A., Powers R.*: Corrosion of the Strand-Anchorage System in Post-Tensioned. Corrosion/2005, Paper No 05266 NACE International.
- [17] Grouting of Tendons in Prestressed Concrete. Guide to good practice prepared by FIB Task Group 9.8 Grouting. July 2002.
- [18] Post-Tensioning Tendon Installation and Grouting Manual. U.S. Department of Transportation FHWA, FHWA-NHI-13-026, May 2013.
- [19] *Tanvir S., Daman K., Panesar A.*: Comparison of Graphene Oxide, Reduced Graphene Oxide and Pure Graphene: Early Age Properties of Cement Composites. Proceedings of the International Conference on Sustainable Materials, Systems and Structures. RILEM Publications, 2019.
- [20] *Jee H., Park J., Her S., Zalnezhad E., Jeong K., Bae S.*: Effect of Titanate Nanotubes on the Properties of Cement-based Composites. Proceedings of the International Conference on Sustainable Materials, Systems and Structures. RILEM Publications, 2019.
- [21] Guidelines for Sampling, Assessing, and Restoring Defective Grout in Prestressed Concrete Bridge Post-Tensioning Ducts. Federal Highway Administration Research and Technology USA, 2013.