



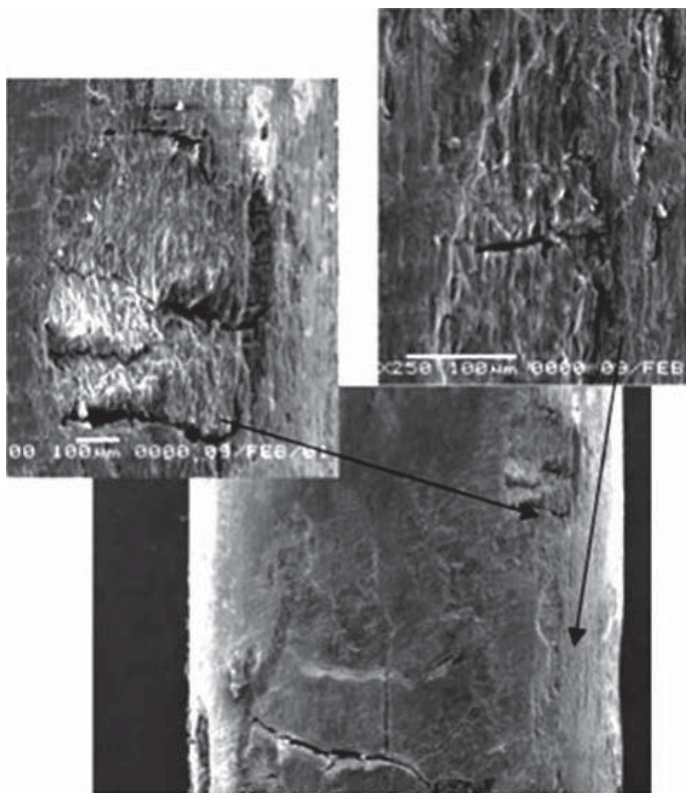
ANDRZEJ JAROMNIAK

## 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]. Obserwujemy 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, Włoch, Internet]

Korozja cięgien w obiekcie mostowym zależy od jego projektu, użytej technologii wykonania, cech wbudowanych materiałów i środowiska, w którym most jest użytkowany. Problemy korozji stali sprężającej beton są generalnie podobne do problemów korozji prętów zbrojenia żelbetu. Natomiast 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 w nich wżery korozyjne, które doprowadzają do przerwania cięgien w czasie ich napinania i/lub użytkowania mostu. W środowisku wilgotnym i morskim iniekcja w kanały kabli po napięciu cięgien powinna być wykonana w ciągu 7 dni (w środowisku suchym może to być 20–40 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.

Cięgna sprężające zabezpiecza przed korozją sześć poziomów ochrony (rys. 3):

**Poziom 1 – powierzchnia zewnętrzna konstrukcji sprężonej;** odpowiednio uszczelniona zabezpiecza cięgna przed przenikaniem do nich czynników atmosferycznych i zanieczyszczeń; uszczelnieniami są powłoki i membrany na powierzchniach dźwigarów mostów oraz izolacje ich postoi.

**Poziom 2 – wodoszczelny beton sprężonej konstrukcji;** w prefabrykowanych konstrukcjach segmentowych styki segmentów muszą być uszczelnione żywicą epoksydową.

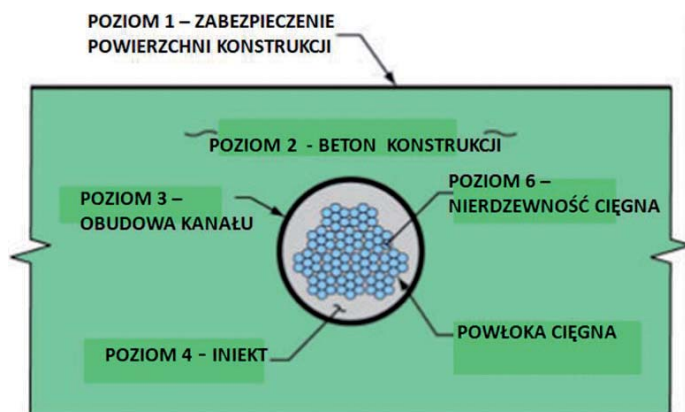
**Poziom 3 – ciągła i szczelna obudowa kanału;** powinna zapewniać skuteczną ochronę cięgien przed kontaktem ze szkodliwymi czynnikami zewnętrznymi.

**Poziom 4 – iniekt w kanałach kabli;** powinien być dobrej jakości, wyprodukowany z certyfikowanych składników i stosowany przez certyfikowany personel.

**Poziom 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 kabla; koszt cięgien w powłoce epoksydowanej jest ok. 3,5-krotnie większy niż bez niej.

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



Rys. 3. Poziomy ochrony przed korozją cięgien sprężających beton [Corven, Moreton: Multi-level corrosion protection of steel strands in tendons, 2013 - Internet]

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

## Iniekt

Celem iniektu cementowego wypełniającego kanał kabla jest zabezpieczenie cięgien sprężających przed korozją oraz zespolenie ich z betonem konstrukcji mostu. Iniekt powinien chronić cięgna przed wilgocią i szkodliwymi czynnikami z otoczenia obiektu mostowego oraz tworzyć wokół cięgien środowisko alkaliczne. Natomiast 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.

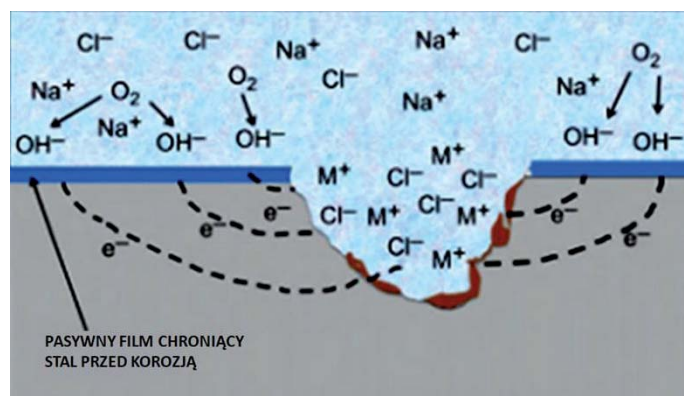
## Czynniki ograniczające pożądane działania iniektu

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 napływająca w kanały może przynosić do cięgien jony chlorkowe i inne agresywne związki chemiczne. W wodzie porowej cementu są obecne siar-

czany. Woda może spowodować korozję cięgien, nawet gdy naturalna zawartość w iniektie chlorków jest stosunkowo niewielka: wynosi rzędu 500 ppm (*parts per million* – części na milion). Warstwa wilgoci na powierzchni stali może stanowić elektrolit dla reakcji elektrochemicznych (rys. 4). Utrzymywanie się tej warstwy zależy od wilgoci, temperatury i agresywnych zanieczyszczeń w kanale kabla. Znaczna korozja występuje przy wilgotności powyżej 75% i zależy od stopnia zanieczyszczeń powierzchni cięgien [13]. Dlatego higroskopijne sole, takie jak chlorki sodu, mogą sprzyjać kondensacji wody z powietrza, przy niższej 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 na niej korozji wskutek tworzenia się niechroniącej powłoki z produktów korozji.

Natomiast w suchych kanałach rozwój korozji cięgien bywa niewielki lub w ogóle korozja nie występuje. Gdy jednak w suchym kanale pojawi się w nich wilgoć, np. w postaci resztek wody porowej lub wskutek infiltracji wody przez nieszczelności kanału, to 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 poziomach wilgotności względnej.



Rys. 4. 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]

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

Nawet śladowe ilości w wodzie chlorków mogą z ich dopuszczalną ilością w iniektie 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 karbonatyzacją, stwarzają warunki, w których następuje zanik pasywacji stali cięgien.

Duże zagrożenie cięgien korozją stwarzają sole. Sól stosowana do zwalczania śliskości zimowej 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 na cięgna wilgoci 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 nie osłabiać pasywacji stali, gdy reagują z zawartym w cemencie tlenkiem glinu, tworząc 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  $\text{pH} \leq 12,6$ , 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  $\approx 12,1$ ), 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 dla rozwoju korozji stwarza także małe utlenienie iniektu będące rezultatem ograniczonej ilości w kanale tlenu i wysoka alkaliczność wody porowej iniektu (pH > 14), które umożliwiają stabilność jonu  $\text{HFeO}_2^-$  [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 hydrolizy z udziałem jonów siarczanowych takie, jak  $\text{Fe}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2 + 2\text{H}_2\text{SO}_4$  [11]. Obecność siarczanów w iniekcie może powodować w roztworze wodorotlenku wapnia o pH  $\approx 12$  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 dla 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, nieshydryzowany cement, wilgoć, mała gęstość, plastyczność, pustki i zawartość agresywnych czynników chemicznych. Szkodliwymi czynnikami chemicznymi są jony chlorkowe  $\text{Cl}^-$ , gdy ich stężenie przekracza 0,08% oraz jony siarczanowe  $\text{SO}_4^{2-}$ , przy stężeniu przekraczającym 0,2% ciężaru cementu w iniekcie oraz dwutlenek węgla. Zdarzają się jednak przypadki korozji cięgien w iniekcie przy mniejszych stężeniach jonów niż te graniczne. Obecność jonów powoduje depastywację stali i/lub zmniejszenie rezystywności iniektu.

Badania w użytkowanych mostach stanu kabli 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. 5),
4. stwardniałego, szarego, suchego.

W niektórych kablach znajdowano iniekt w tych wszystkich czterech stanach. Iniekt w stanie 4, jedyny który zabezpiecza cięgna przed korozją, występował w dolnych częściach kanałów, natomiast iniekty w stanach 1 i 2 – były głównie w najwyższych odcinkach kabli. Świadczy to, że segregację iniektu powodują siły grawitacji. Odcinki z rozsegregowanym iniektem często zawierały wzdłuż górnej części kanału kabla pustki powietrzne.

W niektórych miejscach swobodna woda zgromadzona w górnych częściach przekrojów kabli oraz w wysoko położonych ich odcinkach zawierała duże stężenia jonów korozyjnych ( $\text{Cl}^-$  i  $\text{SO}_4^{2-}$ ), aktywizujących korozję cięgien.

Największe stężenia jonów  $\text{Cl}^-$  stwierdzano w górnych częściach poprzecznych przekrojów kanałów. Wskazuje to, że migracja tych jonów w górę występowała w czasie wiązania iniektu.



Rys. 5. Stan iniektu w zewnętrznym kablu sprężającym most Ringling Causeway na Florydzie (kolor różowy wystąpił pod wpływem fenoloftaleiny; świadczy, że pH iniektu jest w zakresie 8,2–12,0; z prawej strony, u góry widać śrubokręt wciśnięty w miękki iniekt) [FHWA-HRT-14-039, May 2014]

Korozja cięgien odkryta w stosunkowo krótkim czasie

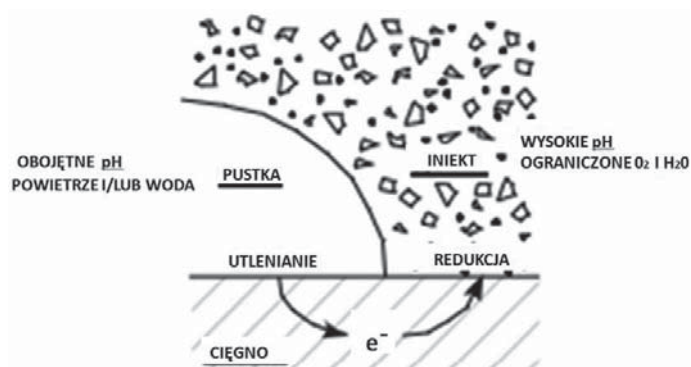
po zbudowaniu mostów, wystąpiła również w miejscach, w których stężenia jonów  $\text{Cl}^-$  były stosunkowo małe, poniżej granicznych 0,08% ciężaru cementu. Uznano, że w tych miejscach głównymi powodami korozji były: osiadania i segregacja głównymi powodami korozji były: osiadania i segregacja iniektu 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 wtlaczania go w kanały i niewłaściwej technologii wtlaczania (iniekcji). Defekty iniektu narażają cięgna na uszkodzenia przez korozję.

Rozsegregowany iniekt zwykle charakteryzuje się dużą wilgotnością (rzędu 80%), dużym stężeniem wolnego siarczanu i małą zawartością chlorku. Pomimo wysokiego pH wody porowej iniektu (przekraczającego 12–13), istnieją warunki dla silnej korozji cięgien. Z rozsegregowanym iniektem jest związane duże stężenie jonów siarczanowych [12], [3], [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 wywołująca reakcje elektrochemiczne. Badania wykazały, że **największa korozja cięgien występuje w strefach kontaktu cięgno – iniekt – pustka powietrzna** (rys. 6). W każdej z tych stref powierzchnia cięgna ma inny potencjał elektryczny [15]. Korozję przyspiesza prąd makrokomórkowy, przepływający pomiędzy obszarem anodowym, jakim jest powierzchnia kontaktu iniektu z powietrzem i katodową masą iniektu.



Rys. 6. Reakcje elektrochemiczne w powierzchni kontaktu pustka/iniekt [NCHRP 14-28]

## Pustki w iniekcie (rys. 7 i 8)

Najczęstszą przyczyną powstawania pustek jest grawitacyjne wydzielanie z iniektu wody (*bleeding*). Przyczynami bywają również: zła konsystencja i segregacja iniektu, zatkanie nim kanału w czasie iniekcji, uwięzienie powietrza

spowodowane nieodpowiednim odpowietrzeniem kanału, niecałkowite wypełnienie go iniektem, docisk cięgien do ściany kanału oraz kombinacja tych przyczyn. Kanały 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 procedury 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 najwyższej położonych odcinkach tras kabli, w których gromadzi się woda wydzielona z iniektu. Do tych miejsc podciągają wodę także wąskie szczeliny pomiędzy cięgnami, działające jak kapilary.

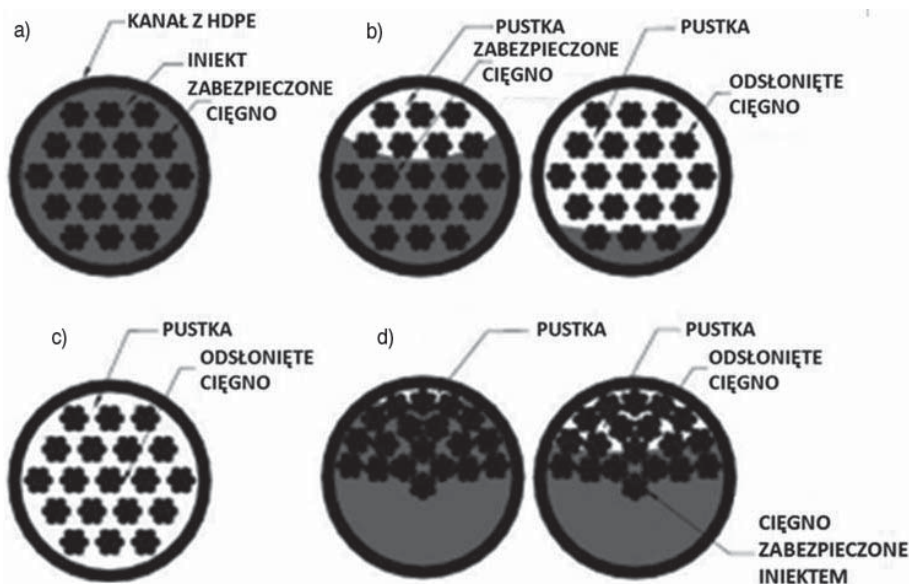
Pustki stwarzają zagrożenia dla cięgien sprężających ponieważ:

- 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 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.

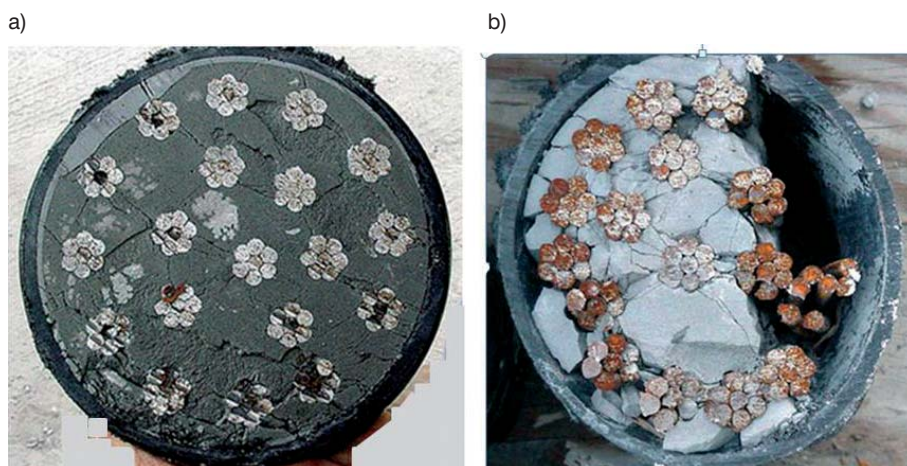
Szybkość korozji cięgien związanej z pustkami zależy od cech powierzchni cięgien oraz dostępności do pustek wody i powietrza. Korozję intensyfikuje karbonatyzacja iniektu i zwiększona ilość chlorków.

W strefach zakotwień kabli pustki mogą doprowadzić do zaniku pasywacji cięgien i metalowych elementów zakotwień. Występuje to w przypadku nieuszczelnienia tych stref. Wtedy w pustki dostaje się powietrze i woda. Nawet umiarkowana karbonatyzacja iniektu przez  $\text{CO}_2$  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 tylko niewielki jej rozwój. Jednak zawsze należy traktować pustkę jako miejsce prawdopodobnej korozji cięgien, wymagające szczegółowego skontrolowania. Nawet, gdy 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).



Rys. 7. Przekroje poprzeczne kabli: a) kabel idealny (bez pustek), b) kabel w pobliżu strefy zakotwienia (przy końcu belki), c) kabel pionowy w górnej części sprężonego korpusu filara (rezultat sedymentacji iniektu), d) kabel przy dewiatorze zmieniającym jego trasę oraz w środku długości dźwigara kablabetonowego [NCHRP 14-28]



Rys. 8. Przekroje poprzeczne kabli sprężających: a) z kanałem prawidłowo wypełnionym iniektem, b) z pustkami i spękaniem iniektu [Internet]

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 – generalnie 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 robiony z cementu portlandzkiego oraz może zawierać żużel wielkopiecowy, pył krzemionkowy, popiół lotny, domieszki regulujące czas wiązania, napowietrzające, zapo-

biegające wydzielaniu wody i hamujące korozję. Nie stosuje się domieszek powodujących pęcznienie, ponieważ zmniejszają trwałość iniektu.

Poniżej przedstawiono kilka podstawowych zasad technologii iniekcji zaczerpniętych z zaleceń Komitetu FIP-RILEM ds. Iniekcji Kabli Sprężających:

- stosunek woda/cement iniektu powinien być możliwie najniższy,
- wydzielanie wody z iniektu w temperaturze  $+18^{\circ}\text{C}$  nie powinno przekraczać po 3 godzinach od wymieszania 2% objętości iniektu (maksymalnie 4%), a wydzielona woda musi zostać wchłonięta w związany iniekt w ciągu 24 godzin,
- należy stosować cement portlandzki lub portlandzki wielkopiecowy, niezawierające chlorku wapnia,
- można stosować dodatki do iniektu, np. zwiększający urabialność, zmniejszający wydzielanie wody, napowietrzający. Dodatki nie mogą zawierać chlorków i azotanów. Ich działanie należy sprawdzić laboratoryjnie,
- mieszalnik powinien wytwarzać iniekt o jednolitej konsystencji, wskazane, aby o cechach koloidalnych; czas mieszania iniektu zależy od rodzaju mieszalnika; zwykle wynosi od 2 do 4 minut,
- po wymieszaniu, należy iniekt utrzymywać w ciągłym ruchu,
- przed wtlaczaniem iniektu należy kanał przepłukać wodą; po przepłukaniu należy wodę pozostałą w kanale usunąć sprężonym powietrzem lub w inny sposób,
- iniekt należy pompować z możliwie najniższym ciśnieniem, nieprzekraczającym 1 MPa; na wlocie do kanału ciśnienie nie powinno przekraczać ok. 0,5 MPa; czasami może być początkowo konieczne wyższe ciśnienie, aby upłynnić iniekt o cechach tiksotropowych, ale po upłynnieniu ciśnienie pompowania powinno być takie, jak w przypadku zwykłych iniektów,

- w przypadku bardzo dużych kanałów może być konieczne powtórzenie wtlaczania iniektu, które przeprowadza się po około 2 godzinach.

Gdy nie uzyskuje się pełnego zainiektowania kanału kabla, to należy uzupełnić iniekcję poprzez 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 i po zakończeniu iniekcji.

Po 24 godzinach 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 niszczącymi: termografią w podczerwieni, echa uderzenia i sondowaniem dźwiękowym.

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. Wydzielają mało wody, są wytwarzane wyłącznie z materiałów paczkowanych (*prepackaged*), dostarczanych przez atestowanych producentów. 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 niezespólonych z konstrukcją betonową, zabezpieczonych przed korozją wypełniaczami, takimi jak uretany oraz stabilne, obojętne chemicznie, woski i smary z ropy naftowej, z dodatkami 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 d/s. 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 poprzez hermetyzację stali sprężającej oraz działanie jako bariera fizyczna. W przeciwnieństwie do iniektu cementowego, smar i wosk nie muszą zmniejszać korozji, ale stanowią osłonę przed czynnikami, które ją powodują. Normy europejskie wymagają określenia korozyjności wosku testami korozji taśmy miedzianej w temperaturze 100°C oraz smaru – testami Emcor. Obawy związane z zachowaniem się cięgien niezespólonych z konstrukcją betonową, zabezpieczonych zgodnie z procedurami iniekcji wypełniaczami z wosków i smarów, a także obawy związane z trwałością mostów z takimi wypełniaczami nie zostały jeszcze rozwiązane, aby rozpowszechnić tę technikę.

## Iniekcja próżniowa

Iniekcja próżniowa 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 ok. 0,1 kPa. Następnie po obróceniu zaworu wtłacza się w kanał iniekt. Podciśnienie jest utrzymywane do czasu wypełnienia całego kanału iniektem i doprowadzenia jego ciśnienia

do ok. 0,7 MPa. Iniekcja próżniowa jest stosowana zarówno do wypełniania kanałów kabli, jak i do likwidacji pustek. Eliminuje w iniekcji pęcherzyki powietrza, przez co zmniejsza powstawanie pustek powodowanych wydzielaniem wody. Proces iniekcji próżniowej jest ciągły i szybki. Wymaga dobrego uszczelnienia kanału, aby umożliwić uzyskanie odpowiedniego ciśnienia iniekcji, koniecznego do wypełnienia iniektem całego kanału.

## Wypełnianie wykrytych pustek

Obejmuje następujące czynności: wywiercenie otworu do pustki, zmierzenie jej objętości i wypełnienie pustki materiałem naprawczym. Podstawowym wymaganiem 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 wysanego 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 wtłoczonego wypełniacza jest mniejsza niż objętość pustki, to wtłaczanie 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 minutę 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 wysoka wartość pH, przy których 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 wytlukiwania wadliwego iniektu, kanał należy osuszyć. Ostatnio badano techniki suszenia połączone z impregnacją cięgien inhibitorami.

## Kontrola stanu kabli sprężających

Metody kontroli stanu kabli, w tym stanu iniektu, 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, ewentualnie, pobraniu do badań laboratoryjnych próbek tych elementów. 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; sprężysto-magnetyczna; elektryczna tomografia pojemnościowa,
- metody magnetyczne: wycieku strumienia magnetycznego, aktywnego i rezidualnego; indukowanego pola magnetycznego; mikromagnetyczna; czujników magnetostrykcyjnych,
- metody fali mechanicznej i wibracji: kontrola dźwiękowa; echa uderzenia; emisji akustycznej; prędkości impulsu dźwiękowego/ultradźwiękowego; echa ultradźwięków; tomografia ultradźwiękowa; ultradźwięków małej częstotliwości; 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 domenie czasu; optyczna reflektometria w domenie czasu; czujników bezprzewodowych („Smart Peble” – wykrywających w betonie chlorki oraz wbudowanych w kable, wykrywających korozję cięgien); czujników światłowodowych z siatką: długookresową i *Braga*; zewnętrznego interferometru *Fabry-Perota* oraz tensometrów strunowych,
- metody przepływu powietrza,
- pomiar sił w kablach.

Charakterystykę tych metod zawiera artykuł autora [10].

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

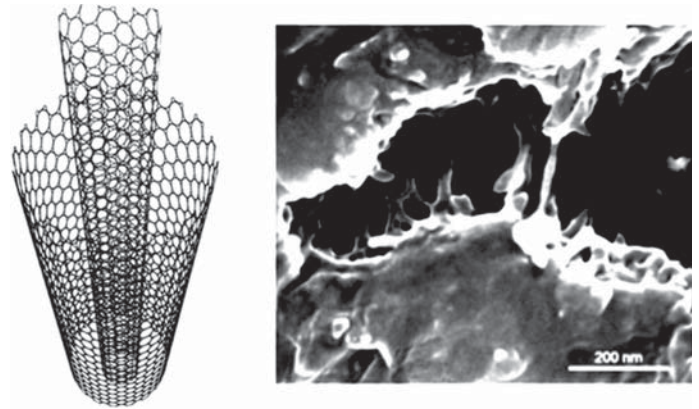
## Perspektywy poprawy cech iniektu

Nowe możliwości ograniczenia wad iniektów cementowych stwarzają nanomodifikatory. Są to nanorurki węglowe i tytanianowe. Zdyspergowane 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 1–100 nm, tytanianowe dostępne na rynku – średnicę zewnętrzną  $11 \pm 1,9$  nm, wewnętrzną  $5 \pm 0,8$  nm, długość  $100 \pm 36$  nm, pole powierzchni ok.  $200 \text{ m}^2/\text{g}$  [20] (nm, nanometr = miliardowa część metra).

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 ponad 30% i na zginanie 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 ok. 11% i na zginanie ok. 23% [20].



Rys. 9. Struktura dwuściennej nanorurki węglowej (z grafenu) oraz obraz mikro-pustki w spoiwie cementowym zawierającym nanorurki tytanianowe, uzyskany elektronowym mikroskopem skaningowym [20]

Analiza obrazów spoiwa cementowego z nanorurkami tytanianowymi, uzyskanych elektronowym mikroskopem skaningowym (EMS) wykazała, że wypełniają w spoiwie pustki, szczeliny i pory wielkości 10–100 nm. Zagęszcza to mikrostrukturę spoiwa, łagodzi i zmniejsza w nim propagację pęknięć. Nanorurki przenoszą siły wewnętrzne poprzez mikropustki i mikropęknięcia spoiwa [20]. Obraz stwardniałego cementu z nanorurkami tytanianowymi wykonany EMS jest pokazany na rysunku 9.

## Bibliografia

- [1] Al-Tayyib A.J., Somuah S.K., Boah J.K., Leblanc P., Al-Mana A.I.: *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.
- [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.

(Dokończenie na stronie 261)