

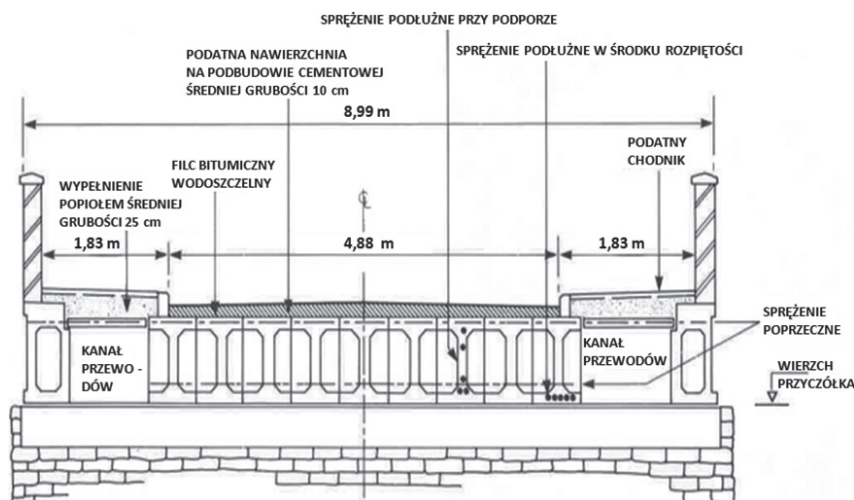
## Zagrożenia cięgien sprężających w mostach kablobetonowych

Mosty kablobetonowe odpowiednio zaprojektowane i zbudowane należą do konstrukcji najbardziej trwałych i wymagających najmniejszych nakładów na utrzymanie. Natomiast niepoprawnie zaprojektowane i/lub zbudowane ulegają wpływom szkodliwych czynników środowiskowych, które skracają długość ich użytkowego życia oraz zmniejszają z czasem ich nośność. Może to doprowadzić do awarii lub katastrofy. Największe bezpośrednie zagrożenia dla kablobetonowych obiektów mostowych stwarzają uszkodzenia cięgien sprężających wskutek korozji i przyspieszonego przez nią zmęczenia stali cięgien. Głównym powodem jest nieprzestrzeganie zasad technologii: użycie niewłaściwego iniektu cementowego do ochrony cięgien, niewłaściwe wykonanie iniekcji, nieuszczelnienie kanałów kablowych i nieodpowiednie użycie materiałów metalowych stosowanych w ich zakotwieniach.

### Przykłady awarii i katastrof mostów kablobetonowych

**Kładka dla pieszych Bickton Meadows**, Hampshire, Wielka Brytania [18]. Jej załamanie w 1967 r. było pierwszą poważną katastrofą kablobetonowej konstrukcji mostowej, spowodowaną przez korozję cięgien sprężających. Kładka była wykonana z prefabrykowanych segmentów połączonych cienkimi warstwami zaprawy cementowej o bardzo niskiej jakości. Połączenia były przepuszczalne, co umożliwiałało przenikanie wilgoci, tlenu i chlorków do cięgien w miejscach ich przechodzenia przez styki segmentów. Spowodowało to przyspieszoną korozję cięgien. W momencie katastrofy kładka miała 15 lat.

**Most Ynys-y-Gwas** przez rzekę Aftan w Walii, Wielka Brytania. Rozpiętość przęsła tego mostu, zbudowanego w roku 1952, wynosiła około 18 m. Konstrukcja górna zawierała jedenaście belek kablobetonowych (rys.1):



Rys. 1 Przekrój poprzeczny mostu Ynys-y-Gwas (1953-1985)

dziewięć o przekroju dwuteownika szerokostopowego, które w moście stykały się półkami górnymi i dolnymi, oraz dwie belki skrajne o przekroju skrzynkowym. Na belkach spoczywała podatna nawierzchnia z podbudową cementową. Belki wykonano z segmentów prefabrykowanych. Każda belka dwuteowa była sprężona pięcioma podłużnymi kablami, które zawierały 12 drutów stalowych dużej wytrzymałości, średnicy około 5 mm. W 1985 r., po 33 latach użytkowania, most zawałił się pod ciężarem własnym, bez wcześniej widocznych oznak zagrożenia.

Na podstawie badań przeprowadzonych po katastrofie przez TRRL (Transport and Road Research Laboratory) stwierdzono, że:

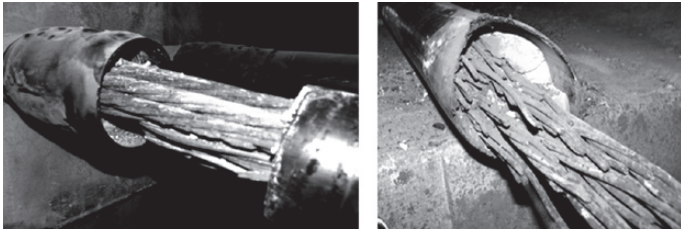
- głównym powodem katastrofy była korozja kabli sprężających, która wystąpiła w pobliżu poprzecznych styków segmentów;
- główną przyczyną korozji drutów kabli były chlorki i wilgotne środowisko pod mostem;
- poprzeczne styki segmentów, mające szerokość około 2,5 cm i wypełnione zaprawą, były miejscami, przez które łatwo do kabli infiltrowała woda i chlorki;
- w próbkach zaprawy pobranych ze styków i w produktach korozji występowały chlorki z soli stosowanej zimą przeciw oblodzeniu nawierzchni drogowej na moście (nie stwierdzono chlorków w próbkach materiału pobranych z prefabrykatów);
- w kanałach kabli były duże pustki w iniekcji;
- druty kabli w pustkach iniektu zostały poważnie skorodowane;
- nie stwierdzono korozji kabli całkowicie otoczonych iniektem.

**Most Varina-Enon** przez rzekę James w pobliżu Richmond, Virginia, USA (rys. 2) [18]. Most został oddany do użytku w 1990 r. W roku 2007 pękł jeden z zewnętrznych kabli sprężających skrzynkową, segmentową konstrukcję przęsła (rys. 3). Awaria zdarzyła się po niecałych czterech latach od naprawy mostu, która polegała na wypełnieniu iniektem pustek wykrytych w kanałach kabli. Uznano, że w miejscach kontaktu iniektów starego i nowego, mających różne cechy, mogły być warunki do powstania galwanicznych ogniw korozyjnych. Jednak zasadności tej hipotezy nie zbadano. Stwierdzono, że w czasie budowy mostu wiele kabli nie zostało skutecznie zabezpieczonych przed wilgocią. Prawdopodobnie dopływ wilgotnego powietrza do wnętrza kanałów przyspieszył korozję cięgien.

**Most Bob Graham Sunshine Skyway** przez Zatokę Tampa, Floryda, USA (rys. 4) [18]. Długość mostu wynosi 6598 m. Zawiera on trzy przęsła podwieszane, z przęsłem



Rys. 2. Most Varina Enon (Internet)



Rys. 3. Skorodowane cięgna zewnętrznego kabla mostu Varina Enon (Jeff Pouliotte, Department of Transportation State of Florida)

centralnym rozpiętości 366 m położonym 55 m nad drogą wodną, oraz kablobetonowe belkowe przęsła dojazdowe, usytuowane nisko nad wodą zatoki. Belki są sprężone kablami zewnętrznymi, z cięgnami w kanałach z polietylenu dużej gęstości (HDPE). Most został oddany do użytku w 1987 r. Po 8 latach stwierdzono poważne uszkodzenia w wyniku korozji cięgien sprężających w strefach ich zakotwień. Na podstawie badań za główne przyczyny uszkodzeń uznano:

- niską jakość iniektu i nieprawidłową metodę iniekcji;
- pustki w kanałach kabli, powstałe w iniektcie wskutek odparowania wydzielonej z niego wody;
- infiltrację słonej wody z zatoki i spływającej z pomostu w kanały kabli przez słabo uszczelnione połączenia segmentów obudowy kanałów, pęknięcia obudowy, otwory w zakotwieniach;
- wilgotne i zanieczyszczone chlorem środowisko otaczające odsłonięte cięgna.

**Most Mid-Bay** przez Zatokę Choctawhatchee, Floryda, USA (rys. 5) [15,18]. Most ma długość około 5,8 km. Jego górna konstrukcja, położona nisko nad wodą, jest wykonana z segmentów prefabrykowanych. Przeszło ma pięć segmentów długości 5,47 m. Rutynowa kontrola w 2000 r.



Rys. 4. Most Bob Graham Sunshine Skyway (Internet)



Rys. 5. Most Mid-Bay (Internet)

wykryła zniszczenie przez korozję jednego zewnętrznego kabla i uszkodzenie drugiego, korozję w strefach zakotwień oraz pękniętą obudowę kanału kabla. W rezultacie szczegółowej kontroli stanu mostu stwierdzono:

- zaawansowaną korozję kabli w strefach zakotwienia i w ich pobliżu; w moście musiano wymienić 11 kabli;
- dużą ilość pustek w kanałach kabli w strefach zakotwienia lub w ich pobliżu oraz w środkowych częściach przęsła; pustki powstały w czasie iniekcji kanałów wskutek odparowywania i (lub) wchłaniania wody wydzielonej z iniektu;
- grubość pokrycia iniektu cięgien wewnątrz kanałów od 0 do około 38 mm;
- karbonatyzację iniektu sięgającą do 6 mm; pH w pobliżu pustek wynosiło od 8 do 9, a wewnątrz iniektu – około 12; dezagregację iniektu (biały kolor powierzchni iniektu przy pustkach zmieniał się poza nimi do ciemnoszarego; blisko pustek na powierzchni zaczynu występował biały osad; prawdopodobnie było to sproszkowane aluminium środka ekspansywnego użytego w iniektcie);
- spękania niektórych kanałów kablowych z HDPE, prawdopodobnie wskutek niespełniania przez ten materiał wymagań specyfikacji i/lub nadmiernych naprężeń spowodowanych zginaniem; naprężenia te mogły zwiększyć: wykonanie iniekcji w niskiej temperaturze, rozszerzanie się iniektu wskutek działania zawartego w nim środka ekspansywnego oraz pustki w iniektcie.

Most zamknięto dla ruchu. Po wymianie 11 kabli został otwarty, ale tylko dla samochodów osobowych.

**Most Niles Channel**, Floryda, USA [15,18]. Jego długość wynosi około 11 km. Jest nisko położony nad zwierciadłem słonej wody. Stanowi element autostrady nadmorskiej przez archipelag Florida Keys. Jest kablobetonowy, z segmentów prefabrykowanych. Konstrukcję każdego przęsła sprężono 234 kablami zewnętrznymi, zabezpieczonymi w kanałach iniekttem. Most został zbudowany w 1983 r. Po 16 latach użytkowania jeden kabel pękł w pobliżu końca przęsła. Powodem była silna korozja cięgien spowodowana infiltracją wody zanieczyszczonej chlorem w strefę zakotwienia kabla (znajdującą się przy dylatacji). W iniektcie zabezpieczającym kable w zakotwieniu stwierdzono pustki.

Szczegółowa kontrola stanu mostów Mid-Bay i Niles Channel oraz badania laboratoryjne i makiety strefy zakotwienia kabli wykazały, co następuje [15].

1. Poważna korozja, która wystąpiła w kablach sprężających górne konstrukcje mostów była związana z pustkami w iniektcie mającym zabezpieczać przed nią cięgna kabli oraz z działaniem jonów chlorku. Pustki powstały wskutek wydzielania się wody z iniektu po jego wtłoczeniu w kanały kabli, natomiast jony chlorku działały w miejscach, w których występowały okresowe przecieki wody w kanały.

2. Badania laboratoryjne iniektu wykazały, że nawet niewielkie drgania (normalne w warunkach budowy) mogą drastycznie zwiększyć ilość wody wydzielanej z iniektu.

3. Badania makiety strefy zakotwienia kabli, zawierającej odcinki cięgien oraz elementy ich zakotwienia z żeliwa sferoidalnego i kutej stali węglowej, częściowo stykające się ze stwardniałym iniektem, obejmujące okresowe polewanie makiety wodą umiarkowanie zanieczyszczoną jonami chlorku i wodą bez zanieczyszczeń, wykazały w ciągu 6 miesięcy poważny rozwój korozji cięgien i elementów ich zakotwień.

4. Pomiary elektrochemiczne makiety zakotwień wykazały, że część powierzchni cięgien i elementów zakotwienia stawała się aktywna korozyjnie po oblanie wodą i pozostawała taką przez dłuższy czas, nawet gdy woda nie zawierała jonów chlorku. Stwierdzono, że korozja występowała w strefach przejściowych iniektu – przy pustkach wypełnionych powietrzem; natomiast metal całkowicie otoczony iniektem pozostawał w stanie pasywnym.

5. Iniekt w strefie przejściowej miał zmniejszone pH i zawierał więcej chlorków niż iniekt w swej masie; uznano to za rezultat odparowania wody wydzielonej z iniektu i nasycenia go dwutlenkiem węgla wskutek kontaktu z zewnętrznym powietrzem. Takie warunki powodowały depasycję i w konsekwencji uszkodzenia korozyjne elementów metalowych w strefach przejściowych iniektu – przy pustkach.

6. Korozję w strefie przejściowej intensyfikowało sprzężenie galwaniczne małej aktywnej i dużej pasywnej powierzchni metalu, otoczonej iniektem. Pomiary elektrochemiczne wykazały, że przez większość czasu elementy zakotwienia były względem cięgien katodowe, co znacznie zwiększyło korozję cięgien.

7. Szybkości rozwoju korozji określone w makiecie zakotwienia były takie same, jak ustalone w moście.

8. Za najważniejsze wnioski z badań uznano stwierdzenie, że podstawowymi wymaganiami co do budowy mostów kablobetonowych powinno być zapobieganie wydzielaniu wody z iniektu oraz unikanie rozwiązań, które mogą sprzyjać galwanicznej korozji cięgien.

**Most Ringling Causeway** (rys. 6) [18]. Przekracza on Zatokę Sarasota na Florydzie. Ma długość 944 m, 11 przęseł rozpiętości od około 56 do 92 m, przekrój skrzynkowy trójkomorowy. Został zbudowany z prefabrykowanych segmentów sprężonych kablami wewnętrznymi i zewnętrznymi. Jezdnia mostu jest 18 m nad poziomem zatoki. W 2011 r., po około 8 latach użytkowania korozja



Rys. 6. Most Ringling Causeway (Jeff Pouliotte: PT Grouting and Corrosion Issues in Florida)

zniszczyła w moście dwa zewnętrzne kable. Kontrola mostu wykazała, że ponad 10% (17) kabli zewnętrznych należy wymienić ze względu na uszkodzenia ich drutów przez korozję. Wywołało to zaniepokojenie, ponieważ ciężna była zabezpieczona iniektem cementowym, tiksotropowym, wykonanym z materiału paczkowanego, uznawanym za niezawodną ochronę przed korozją. Okazało się, że korozja nie była związana z pustkami w iniekcie, ale występowała w miejscach segregacji iniektu. W najgorszym przypadku iniekt nie stwardniał (rys. 7), miał konsystencję szpachlówki, a po wyschnięciu był kruchy. W innych miejscach iniekt przypominał białą kredę. Wilgotność wadliwego iniektu wynosiła aż 80%. Wartość pH wody porowej iniektu przekraczała 12, a iniektu miękkiego w pobliżu miejsc korozji – 13. Stwierdzono, że główną przyczyną korozji cięgien były chlorki. W niektórych paczkach iniektu ich ilość znacznie przekraczała ilość dopuszczalną, w niektórych była poniżej umiarkowanej, ale mogła zostać zwiększona w procesie segregacji iniektu. Dlatego ilość chlorków mogła przekraczać krytyczną wartość ich stężenia. Jednak nie stwierdzono tego we wszystkich miejscach korozji. Uznano, że silna korozja była związana ze stężeniem wolnego siarczanu nawet około 10 000 ppm (ang. parts per milion – liczba części na milion; oznaczenie stosowane m.in. przy wyrażaniu stężeń, liczby wad na milion możliwości zaistnienia). Zmienność konsystencji i składu chemicznego iniektu występowała głównie w dolnych częściach zakotwień cięgien, a korozja w zakotwieniach – w miejscach niecałkowicie wypełnionych iniektem oraz ze zwiększoną ilością siarczanów i wilgotności.



Rys. 7. Stan iniektu w zewnętrznym kablu sprężającym most Ringling-Causeway na Florydzie – w ramce obszar, w którym pH iniektu jest w zakresie  $8,2 \pm 12,0$ ; z prawej u góry widać szrubokręt wciśnięty w miękki iniekt (FHWA-HRT-14-039, May 2014)

**Mosty kablobetonowe w Polsce.** Nie stanowimy wyjątku w światowej sytuacji stanu i zagrożeń mostów kablobetonowych. Świadczą o tym przypadki mostów: Cłowego przez Odrę Wschodnią w Szczecinie, przez Narew w Pułtusku, przez kanał Ulgi wpływający do Warty na Trasie Bursztynowej w Koninie oraz kablobetonowych konstrukcji Trasy Łazienkowskiej w Warszawie.

#### **Korozja kabli sprężających – mechanizmy i warunki krytyczne**

Mechanizmy korozji stali sprężającej w kablobetonie są generalnie podobne do mechanizmów korozji zbrojenia w żelbecie [2]. Ale konsekwencje konstrukcyjne, nawet małego ubytku przekroju ciężna sprężającego, mogą być znacznie groźniejsze. Do tego problemy stwarzają

kruchość wodorowa oraz pękanie cięgien sprężających wskutek korozji naprężeniowej i dużego obciążenia siłą sprężającą [12]. Należy jednak podkreślić, że samo pojawienie się korozji cięgien sprężających nie zawsze świadczy o zagrożeniu mostu. Z perspektywy inżynierskiej, jeśli rozwój korozji jest odpowiednio powolny, to w najbliższych latach nie zagraża bezpieczeństwu mostu. Jednak zawsze w przypadku stwierdzenia korozji należy rygorystycznie prowadzić jej systematyczną obserwację.

Stal otoczona materiałem zawierającym cement (betonem, iniektem cementowym) jest chroniona powstającą na jej powierzchni pasywną powłoką z hydroksytlenków ( $\text{FeOOH}$ ). Przy typowych dla materiałów cementowych wartościach pH, większych niż 12, aktywność korozji cięgien jest bardzo mała, nawet w przypadku ilości tlenu i wody wystarczającej do rozwoju korozji.

Do wystąpienia i rozwoju korozji jest niezbędny tlen i w większości przypadków – woda. Intensywność korozji cięgien zależy od składu ich stali, naprężeń w cięgnach i środowiska, w jakim most się znajduje. Naprężenia w cięgnach i skład stali są znane z projektu lub można je stosunkowo łatwo określić. Środowisko zależy od lokalizacji mostu. Ponieważ bywa różne, stąd różnice aktywności korozji.

Cięgna sprężające bywają uszkodzane wskutek niżej omówionych rodzajów korozji.

**Korozja równomierna.** Występuje, gdy powierzchnia stali styka się z wodą i tlenem. Wtedy następuje powierzchniowy, równomierny ubytek przekroju cięgna. Aby pojawiła się taka korozja, skład i metalurgia stali muszą być jednolite i wszystkie powierzchnie cięgna muszą być w takim samym środowisku.

**Korozja atmosferyczna.** Ulegają jej cięgna wystawione na działanie atmosferycznych substancji gazowych: tlenu, dwutlenku węgla, pary wodnej i związków chloru lub siarki. Ten rodzaj korozji zależy od warunków środowiskowych. Zwykle elektrolitem jest wilgoć z opadów atmosferycznych, mgły i z innych źródeł.

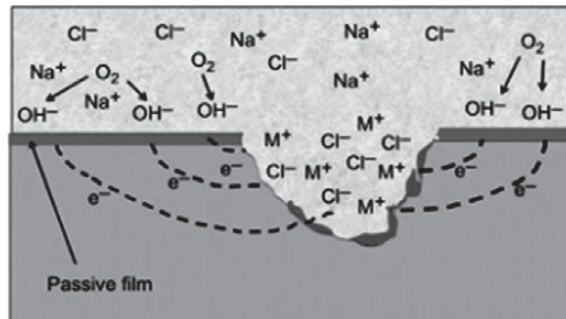
**Korozja z udziałem chlorków.** Gdy elementy z różnych rodzajów stali otoczone jednakowym materiałem cementowym są połączone elektrycznie i/lub gdy w ich otoczeniu są jony chlorkowe, to zwykle korozja stali rozwija się nierównomiernie. Jony chlorkowe nie uczestniczą w reakcjach korozyjnych, ale działają jako ich katalizator, często powodując korozję o kilka rzędów większą niż równomierna. Miejscowe ubytki przekroju cięgien wywołują w nich koncentracje naprężeń, które mogą powodować pęknięcia. Korozję przyspiesza obecność chlorków w pobliżu powierzchni cięgien, gdyż jony chlorków wchodzi w interakcje z powłoką tlenową chroniącą cięgna i wypierają jony hydroksylowe. Ryzyko korozji jest małe, gdy zawartość chlorków w iniekcie nie przekracza 0,4%, duże – gdy przekracza 0,8% [11]. Jony chlorków są powszechne w przyrodzie, a bardzo małe ich ilości są w materiałach do produkcji betonu. Bywają celowo dodawane do betonu jako składnik przyspieszający jego twardnienie. Rozpuszczone w wodzie mogą przenikać w stwardniały beton konstrukcji (np. w środowisku morskim i z soli odładzających).

**Korozja powodowana stężeniem dwutlenku węgla.**  $\text{CO}_2$  może zapoczątkować i zwiększać korozję cięgien otoczonych materiałem zawierającym cement. Migrujący z powietrza w ten materiał reaguje z zawartym w nim wodorotlenkiem wapnia, wytwarzając węglan wapnia. W wyniku tej reakcji w środowisku wilgotnym powstaje wodorowęglan wapnia, którego rozpuszczalność powoduje

z upływem czasu zwiększenie jego porowatości, umożliwiając głębsze wnikanie  $\text{CO}_2$ . Rezultatem jest zmniejszenie pH materiału cementowego otaczającego cięgna. Z czasem zmniejszenie pH „dociera” do pasywnej powłoki  $\text{FeOOH}$ , powodując jej rozpad i przyspieszoną korozję cięgien.

**Korozja galwaniczna.** Bliskie położenie różnych rodzajów stali i żeliwa może spowodować ich sprzężenie galwaniczne, które wywołuje i przyspiesza proces korozji. Powodem są różne potencjały elektryczne różnych metali. Stal cięgien sprężających jest doskonalsza (i bardziej odporna na korozję) niż konwencjonalne zbrojenie – stąd różnica ich potencjałów. Korozja galwaniczna bywa przyczyną przyspieszonej korozji elementów metalowych w strefach zakotwienia kabli.

**Korozja wżerowa i szczelinowa.** Stal ma charakter anodowy, natomiast powietrze wypełniające pustki w kanałach kabli – katodowy. W takim środowisku uszkodzenie powłoki  $\text{FeOOH}$  pokrywającej cięgna wywołuje korozję galwaniczną, powodującą wżery korozyjne. Konsekwencją wżerów jest zmniejszenie przekrojów cięgien, a przez to koncentracje naprężeń, które prowadzą do zmęczenia i pęknięć cięgien. Mechanizm korozji szczelinowej jest taki jak wżerowej. Oba rodzaje korozji występują głównie w strefach zakotwienia cięgien, w których są różne rodzaje stali i żeliwa, oraz przy silnie zbrojonych dewiatorach i przeponach zmieniających trasy kabli. W tych miejscach cięgna bywają narażone na działanie wilgoci, tlenu i jonów chlorkowych. Takie warunki sprzyjają aktywności korozyjnej. Na rysunku 8 przedstawiono schemat procesu korozji wżerowej pasywnego metalu powodowanej chlorkami.



Rys. 8. Schemat procesu korozji wżerowej metalu pasywnego powodowanej chlorkami (Hansson, 2011, Corrosion 2013)

**Korozja komórkowa.** Powierzchnia cięgna stykająca się z elektrolitem mającym różne stężenia koroduje z różną szybkością. Powodem są inne potencjały elektryczne obszarów powierzchni będących w kontakcie z elektrolitem o różnym stężeniu. Na przykład w kropli elektrolitu na powierzchni cięgna stężenie rozpuszczonych gazów w środku kropli jest inne niż przy jej krawędzi, a to wywołuje lokalną korozję, nazwaną komórkową.

**Korozja cierna.** Występuje ona w miejscach styków cięgien kabla z obudową kanału. Jej przyczyną jest ścieranie powierzchni cięgien wskutek drgań i ugięć sprężonej konstrukcji. Tarcie niszczy powłokę  $\text{FeOOH}$  na powierzchniach cięgien i powoduje ścieranie cięgien. Rezultatem jest zmniejszenie ich przekroju oraz odporności na korozję i zmęczenie, powodujące pękanie stali.

**Korozja naprężeniowa.** Jest to rodzaj lokalnej korozji metalu, w którym występują stałe naprężenia szczytkowe wywołane podczas jego produkcji (np. formowaniem na

zimno) lub obciążeniami użytkowymi. Korozja naprężeniowa jest rezultatem łącznego działania agresywnego środowiska i naprężeń.

**Pęknięcia korozyjne.** Są one rezultatem korozji naprężeniowej, ciernej, zmęczenia korozyjnego i działania wodoru. Pęknięcia cięgien wskutek zmęczenia korozyjnego powodują naprężenia powtarzalne w środowisku korozyjnym. Im są większe, tym mniejsza liczba ich cykli doprowadza do awarii. Ponieważ w cięgnach sprężających naprężenia są duże, to zarówno korozja naprężeniowa, jak i zmęczenie korozyjne może spowodować nagłe zerwanie cięgna. Natomiast zagrożenia wodorem mają źródło w produkcji cięgien – w dostępie wodoru do gorącej stali.

**Mechanizmy korozji cięgien** zależą od techniki sprężenia nimi betonu, cech użytych materiałów (cięgien, iniektu), praktyki wykonawstwa oraz środowiska, w którym most jest użytkowany.

Uszkodzenia korozyjne cięgien sprężających mogą się pojawić przed ich wbudowaniem. W czasie transportu i składowania cięgna są wystawione na działanie wilgoci (szczególnie groźne są bryzgi wody morskiej) i innych szkodliwych czynników. Te uszkodzenia mogą zmniejszyć przydatność konstrukcyjną cięgien – spowodować ich pękanie w czasie napinania lub użytkowania. Powodem rys i pęknięć drutów cięgien w czasie napinania bywa także kontakt z ostrymi miejscami metalowej obudowy kanałów, zdeformowanej w czasie budowy.

Również po wbudowaniu cięgien, do czasu wykonania iniekcji kanałów kabli cięgna są wystawione na działanie szkodliwych czynników. W kanały może napłynąć woda, co pogarsza warunki iniekcji, oraz agresywne gazy aktywizujące korozję cięgien. Aktywność korozji, pomimo wysokiego poziomu pH iniektu cementowego (nawet przewyższającego 12), zwiększa obecność jonów chlorkowych i innych czynników agresywnych, szczególnie dwutlenku węgla, którym nasycenie iniektu zwiększa się z upływem czasu.

Kontakt cięgien z wodą zawierającą sól (np. stosowaną do zwalczania śliskości zimowej) znacznie przyspiesza ich korozję.

### Obudowa kanałów kabli sprężających

Obudowy kanałów kabli nie tylko formują w betonie otwory na cięgna sprężające, ale także stanowią barierę zabezpieczającą cięgna przed zanieczyszczeniami środowiskowymi, w tym przed wilgocią, solą i czynnikami atmosferycznymi. Gdy obudowa jest szczelna, to nawet niewłaściwie wykonana iniekcja kanałów nie powoduje zagrożeń cięgien korozją. Natomiast gdy jest nieszczelna, to w przypadku defektów iniektu (pustek, pęknięć, niecałkowitej hydratacji cementu) zabezpieczenie nim jest nieskuteczne.

Nieszczelności obudowy kanałów bywają rezultatem:

- uszkodzeń obudowy przy napinaniu kabli; zdarza się to głównie w przypadku kabli krzywoliniowych (często – gdy promień krzywizny kabla jest mniejszy niż 3 m);
- zbyt małej grubości ścianek obudowy;
- nieszczelności połączeń odcinków obudowy, ich łączników oraz zamknięć otworów iniekcyjnych i odpowietrzników.

Materiały łączników i obudowy kanału powinny być wzajemnie kompatybilne oraz z wypełnieniem kanału, odporne na pogorszenie i uszkodzenia mechaniczne oraz powinny uniemożliwiać infiltrację wody i zanieczyszczeń w kanały.

Problemy powodowane przez obudowę zmniejsza wykonanie jej z HDPE o odpowiedniej grubości oraz odporności na tarcie i uszkodzenia przy napinaniu cięgien, a także sprawdzenie przed iniekcją szczelności kanału ciśnieniem powietrza.

### Wpływ iniektu na korozję cięgien sprężających

Dotychczas powszechnie stosowanym wypełniaczem kanałów z napiętymi cięgnami sprężającymi, mającym chronić je przed korozją, jest iniekt cementowy. Jego zły stan jest powodem większości awarii i katastrof mostów kablobetonowych. Na skutek niewłaściwej technologii iniekt cementowy nie ma cech zabezpieczających stal przed korozją oraz występują w nim pustki, w których odcinki cięgien są narażone na działanie czynników korozyjnych.

• **Wady iniektu.** Badania prowadzone od 2011 r. w Europie i USA (głównie na Florydzie) w związku z przypadkami uszkodzeń przez korozję cięgien mostów kablobetonowych wykazały, że przyczyną korozji bywają: pustki w iniektie, zmniejszona jego alkaliczność, słaba spójność masowa (cohesive bulk), duża wilgotność iniektu oraz duże stężenie w nim jonów siarczanowych. Stwierdzono, że [3, 4, 10]:

– korozja cięgien bywa niezwiązana bezpośrednio z pustkami w iniektie;

– duże stężenia jonów siarczanowych występują w iniektie zdezagregowanym;

– reakcje hydrolizy z udziałem jonów siarczanowych takie, jak  $Fe^{2+} + 2H_2O + 2SO_4^{2-} \rightarrow Fe(OH)_2 + 2H_2SO_4$  powodują korozję lokalną [9];

– siarczany w iniektie zawierającym roztwór wodorotlenku wapnia nawet o pH > 12 mogą zahamować tworzenie się na stali warstwy pasywnej lub spowodować jej zanik [7] oraz zwiększyć prąd korozji stali;

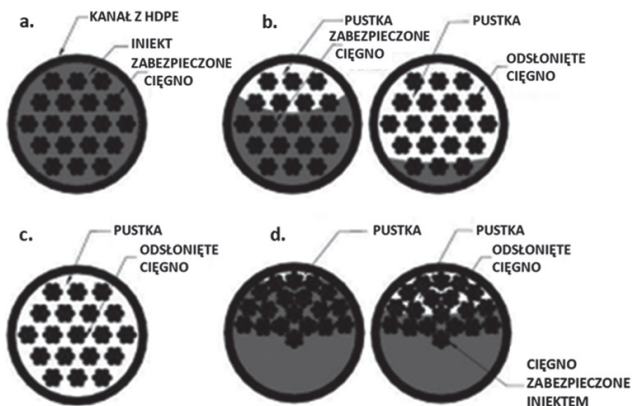
– w miejscach pęknięć obudowy kanałów występują małe uszkodzenia korozyjne, jeżeli iniekt jest tam nieznacznie utleniony (tzn. przy ograniczonym dopływie tlenu) oraz jeżeli wodę porową iniektu cechuje duża alkaliczność (pH > 14); takie warunki stabilizują zawartość w iniektie jonów  $HFeO_2^-$ ;

– reakcje hydrolizy z udziałem jonów siarczanowych takie, jak  $Fe^{2+} + 2H_2O + 2SO_4^{2-} \rightarrow Fe(OH)_2 + 2H_2SO_4$  umożliwiają lokalną korozję [9]; generalnie obecność siarczanów może mieć szereg niekorzystnych następstw: powoduje zanik pasywacji stali w roztworze wodorotlenku wapnia nawet z pH ok. 12,1 [7], hamuje tworzenie się w nim warstwy pasywnej na stali, zwiększa prąd korozji stali w roztworze wodorotlenku wapnia [1].

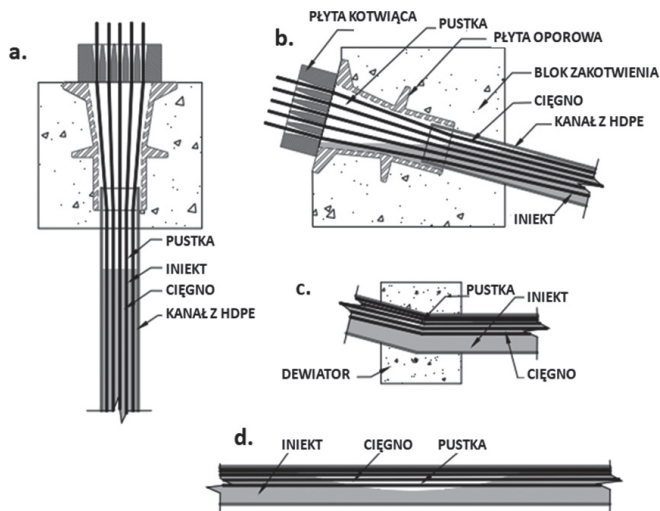
• **Pustki w iniektie.** Charakterystyczne przekroje kabla przedstawiono na rys. 9. Miejsca powstawania pustek zależą od kształtu trasy kabla i odstępów pomiędzy cięgnami. Pustki są często w miejscach pokazanych na rys.10. Najczęściej występują w wysoko położonych odcinkach tras kabli i w strefach zakotwienia cięgien. Bywają wypełnione powietrzem, wodą lub powietrzem i wodą.

Zagrożenie cięgien korozją związane z pustkami wynika z następujących powodów:

– w pustkach cięgna nie są chronione przed korozją przez środowisko alkaliczne (o dużym pH), cięgna są dostępne dla wody/wilgoci, tlenu i chlorków; szybkość korozji w pustce zależy od cech powierzchni cięgien oraz dostępności do pustki wody, powietrza (tlenu, dwutlenku węgla) i zanieczyszczeń (np. soli);



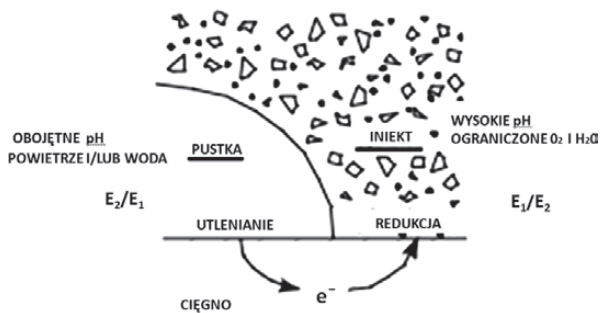
Rys. 9. Przekroje poprzeczne kabli: a) kabel idealny (bez pustek), b) kabel w pobliżu strefy zakotwienia (przy końcu belki), c) kabel pionowy w górnej części sprężonego korpusu filara (rezultat sedimentacji iniektu), d) kabel przy bloku zmieniającym jego trasę (dewiatorze) i w środku długości belki [18]



Rys. 10. Miejsca powstawania pustek w kablu sprężającym: a) strefa zakotwienia cięgien sprężających słup kablobetonowy, b) strefa zakotwienia cięgien sprężających belkę, c) strefa zmiany trasy kabla (dewiatora), d) poziomy odcinek kabla sprężającego belkę [16]

– odcinki cięgien w pustkach powietrznych są w innym środowisku niż otoczone iniektem, co stwarza warunki sprzyjające korozji galwanicznej; powierzchnia cięgna w pustce ma bowiem inny potencjał niż pokryta materiałem cementowym; różnice tych potencjałów mogą być znaczne; schemat procesu takiej korozji, polegającego na przepływie elektronów metalu z obszaru o potencjale ujemnym do obszaru o potencjale dodatnim, pokazano na rys. 11;

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



Rys. 11. Reakcje elektrochemiczne w strefie kontaktu pustka – iniekt [18]

Największe zagrożenia cięgien korozją występują w iniekcie, w strefach kontaktu iniekt – pustka w iniekcie [16]. Powodem są różne potencjały elektryczne powierzchni cięgien w tych strefach. Korozję przyspiesza prąd makrokomórkowy między obszarem anodowym, jakim jest powierzchnia kontaktu iniekt – powietrze, i pasywną masą iniektu oraz karbonatyzacja iniektu i chlorki.

Pustki powstają w iniekcie z wielu powodów. Głównym jest grawitacyjne wydzielanie z iniektu wody (bleeding), tworzące w kanałach „kieszzenie” wodne. Wydzielona woda zanika, pozostawiając w kanałach pustki powietrzne, a w zimnym klimacie może zamarznąć i uszkodzić konstrukcję. Wydzielanie wody zależy od składu iniektu, skuteczności jego zmieszania, wykonania iniekcji i temperatury. Pustki powstają wskutek niewłaściwego materiału iniektu, niewłaściwej iniekcji (zbyt małego jej ciśnienia, niekompletnego wypełnienia kanału i wycieków z niego iniektu oraz nadmiernego rozstawu otworów odpowietrzających i niewystarczającego wypływu iniektu przez te otwory w czasie iniekcji). Ponadto ruch (w czasie iniekcji) powietrza i wydzielonej z iniektu wody może pozostawić w nim bruzdy odsłaniającą cięgna.

Po utworzeniu się pustki poziom w niej wody obniża się wskutek odpływu w pory iniektu, wyschnięcia, odparowywania i kapilarnego podciągania przez wąskie przestrzenie pomiędzy cięgnami kabla do najwyższych miejsc kanału. W suchych warunkach szybkość korozji zmniejsza się, jednak gdy w pustce ponownie pojawi się wilgoć (przeniknie przez nieszczelności kanału), to uaktywnia ona korozję [17].

Intensywna korozja cięgien wystawionych na działanie wody wydzielonej z iniektu może występować nawet, gdy woda jest alkaliczna ( $pH > 12$ ). Uważa się to za rezultat karbonatyzacji iniektu, która może obniżyć  $pH$  nawet do 8 [8].

Dopływ wody zewnętrznej do pustki może zanieczyścić w niej wodę agresywnymi związkami chemicznymi. Wtedy nawet śladowe ilości chlorków w iniekcie (który spełnia wymagania specyfikacji), w połączeniu z chlorkami dopływającymi, mogą utworzyć zbiór jonów chlorkowych wywołujący dużą korozję cięgien [16]. Zwiększona zawartość chlorków w iniekcie przy pustce, w połączeniu z jego karbonatyzacją, niszczy pasywację stali.

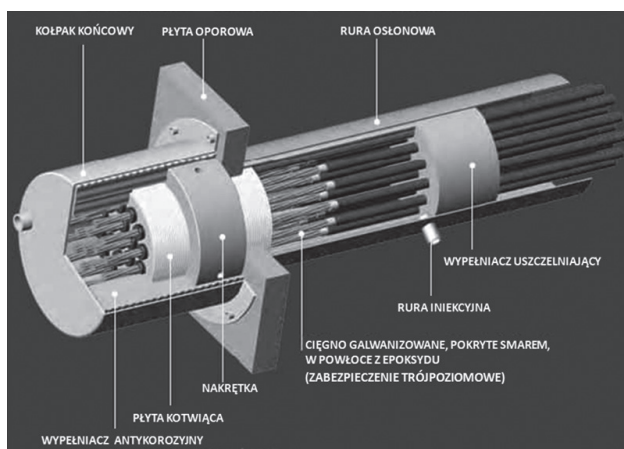
Aby zminimalizować zagrożenia powodowane iniektami z niewłaściwych materiałów, Federalna Administracja Drogowa USA (FHWA) wprowadziła obowiązek stosowania iniektów cementowych tiksotropowych, które wydzielają mało wody, wytwarzanych wyłącznie z materiałów paczkowanych, dostarczanych przez atestowanych producentów. Zmniejszyło to drastycznie przypadki korozji cięgien. Ale okazało się, że również w tych iniektach zdarza się korozja cięgien. W rezultacie pojawiła się tendencja stosowania wypełniaczy takich, jak uretany, stabilne oraz obojętne chemicznie woski i smary bitumiczne, z dodatkiem inhibitorów korozji. Ten rodzaj wypełniaczy jest z powodzeniem stosowany do ochrony cięgien sprężających w przemyśle jądrowym. Uzyskano też pozytywne wyniki użycia tych wypełniaczy w kilku mostach. Wypełniacze bitumiczne nie zespalają cięgien z obudową kanału, co ułatwia wymianę zarówno wypełnienia, jak i uszkodzonych cięgien. Natomiast wadą tych wypełniaczy jest niezdolność do redystrybucji sił w przypadku pęknięcia lub osłabienia cięgna/druku kabla. Wdrażanie wypełniaczy bitumicznych utrudnia: brak specyfikacji materiałowych i konstrukcyjnych, większe koszty

i ograniczone źródła uzyskiwania oraz brak doświadczenia technologicznego.

Dominująca rola procesów elektrochemicznych w korozji spowodowała prace nad jej ograniczeniem przez izolowanie elektryczne elementów systemu sprężania. Informacje o tej najnowszej metodzie zabezpieczania cięgien przed korozją zawiera publikacja [14].

### Strefy zakotwienia kabli

Te strefy są miejscami szczególnego zagrożenia cięgien korozją. Mają skomplikowaną konstrukcję, ponieważ w tych strefach kable są dostosowywane do przekazania siły sprężającej w element betonowy (rys. 12). Wymaga to użycia innego zabezpieczenia cięgien przed korozją niż poza zakotwieniem, ewentualnie zmiany układu cięgien oraz zastosowania elementów kotwiących z różnych metali. Ciężna są ze stali o dużej wytrzymałości, płyta oporowa ze stali kutej (lub element oporowy z żeliwa), płyta kotwiąca ze stali stopowej, pozostałe elementy bywają z żeliwa ciągliwego i sferoidalnego. Poza tym w strefie zakotwienia beton jest wzmocniony konwencjonalnym zbrojeniem. Bliskie położenie różnych metali powoduje pomiędzy nimi interakcje galwaniczne i wywołuje prądy makrokomórkowe, co zwiększa aktywność korozji [17]. Dlatego zaczęto zabezpieczać zakotwienia izolacjami elektrycznymi (rys. 13).



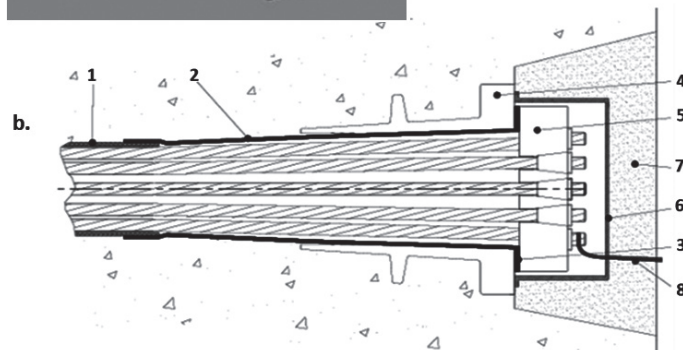
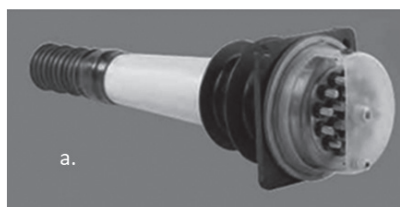
Rys. 12. Przykład zakotwienia cięgien kabla; cięgna chronione zabezpieczeniem trójpoziomym (Anand Paul: Prestress Concrete. Civil Engineering Articles. Civil Digital Com. March. 09. 2017)

Złożoność zakotwienia sprzyja tworzeniu się pustek w iniekcie. Powstają one szczególnie wówczas, gdy rura iniekcyjna jest z dala od strefy zakotwienia. Zdarzające się nieszczelności końcowych kołpaków zakotwień umożliwiają dostęp do cięgien i elementów ich zakotwienia wody, gazów atmosferycznych oraz zanieczyszczeń.

Rola zakotwień i występujące w nich zagrożenia wymagają starannych, regularnych kontroli stanu ich elementów.

### Ochrona katodowa

Systemy katodowej ochrony cięgien, galwaniczne i anodowe, były stosowane w palach i belkach mostowych z betonu sprężonego. Jednak ta metoda ochrony nie jest rozpowszechniana ze względu na możliwość niekorzystnych następstw reakcji katodowych. Alkaliczacja wody porowej iniektu na powierzchni stali, spowodowana polaryzacją katodową, może zmniejszyć wytrzymałość zespoleń stali i cementu [5]. Przy potencjałach bardziej



Rys. 13. Przykład zakotwienia kabla sprężającego izolowanego elektrycznie: a) widok, b) schemat: 1 – obudowa kanału kabla, 2 – stożkowy odcinek obudowy kanału z tworzywa sztucznego (izolacja), 3 – płyta o dużej wytrzymałości (izolacja), 4 – żeliwny element oporowy, 5 – stalowa głowica kotwiąca, 6 – kołpak z tworzywa sztucznego wypełniony iniektem, 7 – beton bezskurczowy zbrojony, 8 – terminal elektryczny (M. Dellavedova, B. Elsner, L. Evangelista: Corrosion Protection and Monitoring of Electrically Isolated Post-Tensioning Tendons, 2004)

ujemnych względem potencjału półkomórkowego reakcji  $H_2O + e^- \rightarrow H_{ads} + OH^-$  występuje nadmierne rozpuszczenie wodoru atomowego sieci atomowej stali, co może spowodować jej kruchość wodorową. Stąd konieczność zapobiegania tworzeniu się wodoru. Innymi komplikacjami ochrony katodowej betonu sprężonego jest wymaganie zapewnienia ciągłości elektrycznej cięgien i innych elementów stalowych, równomiernego rozkładu prądu (przy niekorzystnej geometrii i mieszanych środowiskach systemu kabli sprężających) oraz odpowiedniego ekranowania prądu. Nadal są prowadzone badania związane z tymi problemami.

### Zakończenie

Pomimo zagrożeń konstrukcji kablabetonowych korozją cięgien sprężających, kablabeton jest racjonalnym tworzywem mostów o projektowym życiu użytkowym przekraczającym 75 lat.

Zapobieganie korozji cięgien wymaga holistycznego podejścia, uwzględniającego ekonomikę projektowania i wykonawstwa, cechy i trwałość materiałów, możliwą do osiągnięcia jakość wykonania oraz środowisko i warunki utrzymania mostu. Wymaga stosowania odpowiedniej antykorozyjnej ochrony cięgien oraz szczelności obudowy kanałów i stref zakotwień. Trwają prace doskonalące stal sprężającą odporną na korozję. Jest ona jednak kilkakrotnie droższa i ma gorsze cechy mechaniczne niż zwykła stal sprężająca.

Odpowiedzią na awarie i katastrofy mostów kablabetonowych spowodowane uszkodzeniami kabli przez korozję jest poszukiwanie oraz rozwój nieniszczących metod ich kontroli, koniecznych do systematycznej i wiarygodnej kontroli stanu kabli [18]. Dysponowanie sprzętem do takich badań i umiejętność ich przeprowadzania, a także interpretacji wyników oraz systematyczne kontrole cięgien sprężających są nieodzownymi warunkami racjonalnego utrzymania mostów kablabetonowych oraz zapobiegania ich awariom i katastrofom.

## PIŚMIENNICTWO

- [1] *Tayyib A.J., Somuah S.K., Boah J.K., Leblanc P., Al-Mana A.I.*: "Cement and Concrete Research", 18, 1988.
- [2] *Bertolini L., Elsner B., Pedeferrì P., Polder R.*: Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair. Wiley-VCH, Germany, 2004.
- [3] *Bertolini L., Carsana M.*: High pH Corrosion of Prestressing Steel in Segregated Grout. In: Modeling of Corroding Concrete Structures. RILEM Bookseries vol. 5, RILEM 2011.
- [4] *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 II (3), 2015.
- [5] *Eyre D.*, In: *Chess P.M.* (Ed): Cathodic Protection of Steel in Concrete. E&FN Spon, London 1998.
- [6] *Gee K.W.*: Memorandum. Elevated Chloride Levels in SikaGrout 300PT Cementitious Grout. US Department of Transportation, Federal Highway Administration. Dostępne online: <https://www.fhwa.dot.gov/bridge/111123.pdf>.
- [7] *Gouda V.K.*: Corrosion and corrosion inhibition of reinforcing steel: I. Immersed in alkaline solution. "British Corrosion Journal", 5, 1970.
- [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] *Jones D.A.*: Principles and Prevention of Corrosion, sec. ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, 1996.
- [10] *Lau K., Lasa I., Paredes M.*: Corrosion Failure of Post-Tensioned Tendons in Presence of Deficient Grout. Paper No. 2600. CORROSION/2013. NACE International, Houston, TX, 2013.
- [11] *Lee S.K., Zielske J.*: An FHWA Special Study: Post-Tensioning Tendon Grout Chloride Thresholds. FHWA-HRT-14e039. Department of Transportation, FHA U.S. May 2014.
- [12] *Madaj A., Mossor K.*: Wpływ procesu sprężania na trwałość kablobetonowych konstrukcji sprężonych. „Materiały Budowlane”, 7/2018.
- [13] *Merril B.*: Memorandum. Grout Testing and Analysis. September 14, 2010. Texas Department of Transportation.
- [14] *Piekarski J.*: Elektrycznie izolowane ciągnia sprężające – najbardziej zaawansowana technologia zabezpieczania przed korozją. Konferencja naukowo-techniczna „Konstrukcje sprężone”, Kraków 2018.
- [15] *Powers R.G., Sagúés A.A., Virmani Y.P.*: Corrosion of Post-Tensioned Tendons in Florida Bridges. Florida Department of Transportation, Tallahassee, Florida, 2002.
- [16] *Trejo D., Hueste M., Gardoni P., Pillai R., Reinschmidt K., Im S.B., Hurrebaeus S., Gamble M., Ngo T.T.*: Effects of Voids in Grouted, Post-Tensioned Concrete Bridge Construction, vol. 1. Technical Report to Texas Department of Transportation. FHWA/TX-90/0-4588-1. September 2009.
- [17] *Wang H., Sagúés A.A., Powers R.*: Corrosion of the Strand-Anchorage System in Post-Tensioned.
- [18] NCHRP 14-28. Condition Assessment of Bridge Post-Tensioning and Stay Cable Systems Using NDE Methods. Final Report. 2016.