

KOROZJA STALI SPRĘŻAJĄCEJ W KONSTRUKCJACH KABLOBETONOWYCH. PRZYCZYNY, SKUTKI, ZAPOBIEGANIE¹

Arkadiusz MADAJ, Katarzyna MOSSOR
Politechnika Poznańska

Problem korozji stali sprężającej staje się coraz bardziej istotny ze względu na dużą liczbę obiektów wybudowanych w tej technologii w ciągu ostatnich lat. Korozja stali sprężającej jest zjawiskiem szczególnie niebezpiecznym ze względu na brak możliwości bieżącej kontroli stanu cięgien oraz niesygnalizowane zniszczenie następujące na jej skutek.

Korozja występująca w cięgnach ma zwykle nieodwracalne skutki, a w skrajnych przypadkach może doprowadzić do zerwania kabla. Przedstawiono przykład, gdy zerwaniu na skutek korozji uległ 31-splotowy zewnętrzny kabel sprężający wykonany ze stali o wytrzymałości 1860MPa, jedynie po nieco ponad 10 latach eksploatacji mostu. W związku z wystąpieniem tak poważnej awarii, Autorzy przeanalizowali w artykule własne doświadczenia oraz współczesną wiedzę na temat przyczyn, skutków oraz sposobów zapobiegania korozji stali sprężającej w konstrukcjach kablobetonowych.

W artykule omówiono czynniki sprzyjające korozji stali sprężającej, procesy chemiczne towarzyszące korozji, jej przyczyny oraz skutki. Autorzy przedstawili także sposoby zabezpieczania konstrukcji nowych przed korozją, a także metody napraw konstrukcji uszkodzonych korozyjnie.

Słowa kluczowe: konstrukcja sprężona, stal sprężająca, korozja.

1. WPROWADZENIE

Problem korozji stali sprężającej staje się coraz bardziej istotny ze względu na dużą ilość obiektów wybudowanych w tej technologii w ciągu ostatnich lat. Korozja stali sprężającej jest zjawiskiem szczególnie niebezpiecznym ze względu na brak możliwości bieżącej kontroli stanu cięgien oraz niesygnalizowane zniszczenie (zerwanie) cięgna. Konsekwencją tego może być awaria konstrukcji, a nawet katastrofa budowlana. Mając to na uwadze, w kontekście zerwania kabla w moście po ok. 10 letniej eksploatacji (rys. 1) oraz stwierdzonych na podstawie badań ognisk korozji w innych kablach tego samego obiektu, Autorzy przeanaliz-

¹ DOI 10.21008/j.1897-4007.2018.26.08

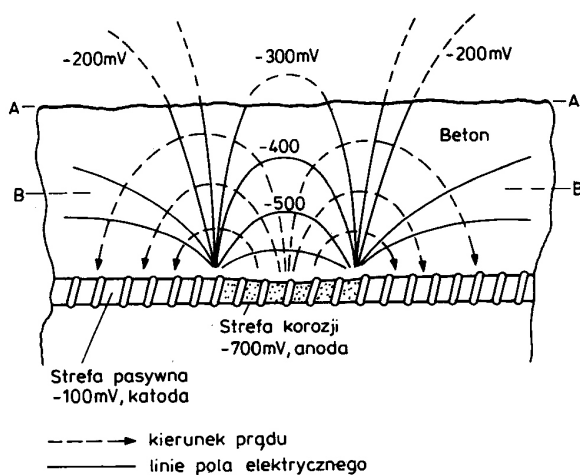
zowali współczesną wiedzę na temat przyczyn, skutków oraz sposobów zapobiegania korozji stali sprężającej w konstrukcjach kabl betonowych.



Rys. 1 Zerwany kabel sprężający zewnętrzny 31-splotowy po usunięciu osłony

2. IDENTYFIKACJA RODZAJU KOROZJI

Korozja kabli sprężających w obiektach budowlanych, w tym w mostach, ma w głównej mierze charakter korozji elektrochemicznej, z dodatkowym wpływem na rozwój wysokich naprężeń rozciągających. Warunkiem koniecznym rozwoju korozji elektrochemicznej jest, poza stałym dostępem tlenu, występowanie na powierzchni stali tzw. obszarów anodowych i katodowych (występowania różnicy potencjałów) będących w otoczeniu elektrolitu, zapewniającego przepływ prądu korozyjnego (rys. 2) [7].

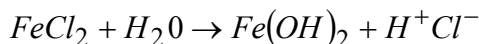


Rys. 2. Rozkład potencjału elektrycznego wokół ogniska korozji stali w betonie

Doświadczenia z charakterem uszkodzeń korozyjnych kabli sprężających wskazują, że najczęstszą ich przyczyną są: korozja wżerowa, często w połączeniu naprężeniowa, korozja cierna. Istotny wpływ na osłabienie cięgien sprężających może mieć również tzw. kruchość wodorowa [2, 3].

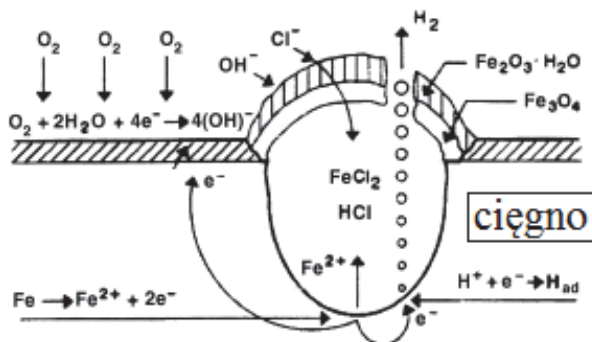
Korozja wżerowa

To proces inicjowany przez powstanie na powierzchni stali lokalnie obszarów o zróżnicowanym potencjale. Warunkiem koniecznym jest depasywacja powierzchni zbrojenia. Sprzyja temu pojawienie się jonów chlorkowych na powierzchni stali, których obecność zaburza warstwę pasywacyjną. O powstaniu obszarów katodowych i anodowych decyduje dostępność tlenu do powierzchni stali. Obszary o zmniejszonej dostępności stają się anodami, w których lokalizują się ogniska korozji. Gdy lokalnie dostępny tlen zostaje wyczerpany, reakcja redukcji ustaje we wżerze i rozpoczyna się w jego sąsiedztwie, gdzie tlen jest jeszcze dostępny. Proces rozkładu żelaza trwa przy jednoczesnym wytworzeniu nadwyżki dodatniego potencjału w rejonie wżeru. W przypadku występowania w betonie chloru, ujemnie naładowane jony chlorkowe są przyciągane przez jony żelaza we wżerze, skutkując zwiększoną koncentracją chlorku żelaza, który ulega hydrolizie, produkując nierozpuszczalną rdzę i wolny kwas:

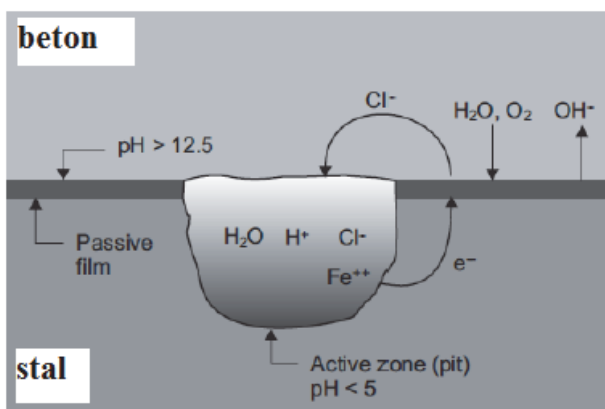


W miarę produkcji kwasu, potencjał obszaru staje się bardziej ujemny. Rejony sąsiednie produkują jony hydroksylowe, które zwiększają odczyn pH obszarów katodowych. Odczyn pH w samym wżerze korozyjnym może wynosić

od 1,5 do 5,0. Reakcje zachodzące we wżerze korozyjnym pokazano na rys. 3 i rys. 4. Na rysunku 5÷8 pokazano sploty z uszkodzeniami korozyjnymi.



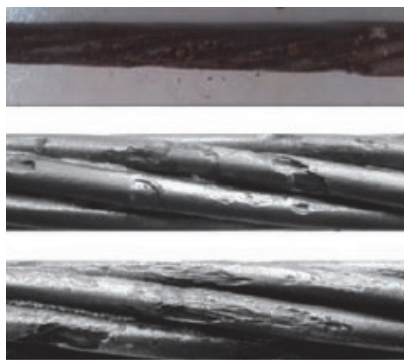
Rys. 3. Reakcje we wżerze korozyjnym [1]



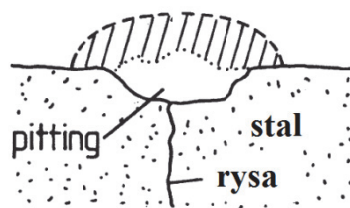
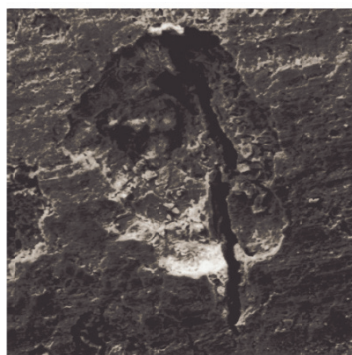
Rys. 4 Reakcje oraz odczyn pH we wżerze korozyjnym



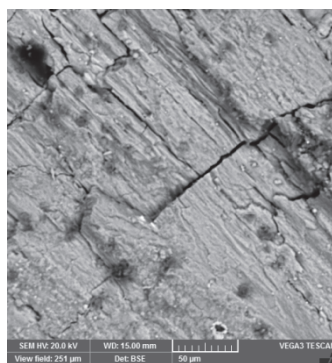
Rys. 5. Ogniska korozji na powierzchni kabla po usunięciu osłony i iniektu



Rys. 6. Sploty uszkodzone korozyjnie przed i po oczyszczeniu [5]



Rys. 7. Pęknięcie korozyjne w miejscu wżeru korozyjnego [9]



Rys. 8 Zdjęcie z mikroskopu scanningowego skorodowanego splotu – widoczne pęknięcia w strukturze stali

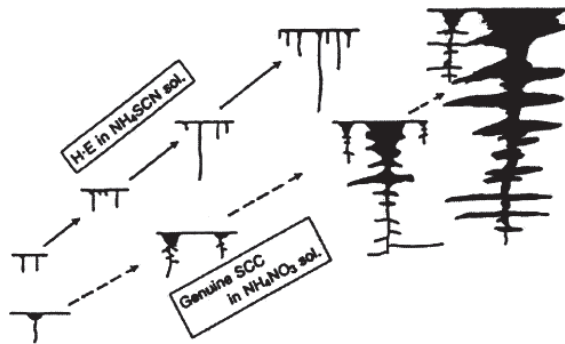
Korozja cierna

Może wystąpić, gdy dwa dociskane elementy przemieszczają się powtarzalnie względem siebie. Do zużycia ścierno-korozyjnego wystarczą przemieszczenia

rzędu 10^{-7} mm. W konstrukcjach kablobetonowych może do niego dojść na styku splotów oraz na styku splotu i osłony kablowej w cięgnach zakrzywionych.

Kruchość wodorowa

Polega na zmniejszeniu ciągliwości stali na skutek absorpcji wodoru atomowego przez sieć przestrzenną kryształów metalu (cząsteczka wodoru jest zbyt duża aby mogła przeniknąć do sieci krystalicznej stali). Wodór może zostać wprowadzony przed wbudowaniem cięgien w konstrukcję – podczas produkcji cięgien, lub podczas jej składowania. Może również zostać wprowadzony w przypadku zastosowania tzw. czynnej ochrony katodowej zbrojenia (przy zbyt dużym napięciu polaryzacji). Stal osłabiona wodorem cechuje się zmniejszoną wytrzymałością na rozciąganie, spowodowaną zmniejszeniem ciągliwości po absorpcji wodoru.



Rys. 9 Rozwój rys w przypadku kruchości wodorowej (górna linia) oraz korozji naprężeniowej (dolna linia) [1]

Trudnym jest rozróżnienie zniszczenia stali na skutek kruchości wodorowej oraz korozji naprężeniowej. Trudność rozróżnienia między tymi sposobami zniszczenia polega na tym, że oba objawiają się kruchym pęknięciem i mogą wyglądać tak samo lub bardzo podobnie (rys. 9). Zniszczenia na skutek kruchości wodorowej oraz korozji naprężeniowej są zdecydowanie rzadziej spotykane niż zniszczenia na skutek korozji wżerowej lub ogólnej.

3. CZYNNIKI SPRZYJAJĄCE KOROZJI ELEMENTÓW SYSTEMU SPRĘŻENIA (STALI SPRĘŻAJĄCEJ I ZAKOTWIENI)

3.1 Uwagi ogólne

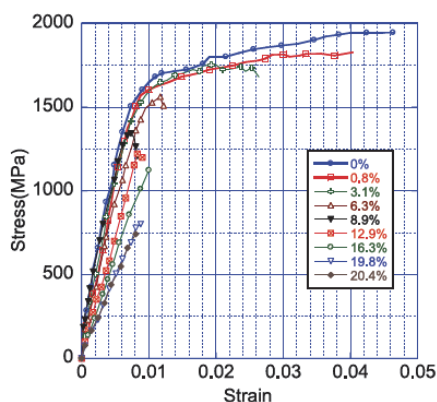
Korozja stali sprężającej może mieć różne przyczyny. Najczęściej dochodzi do niej w wyniku błędów wykonawczych – niewłaściwego składowania i transportu cięgien sprężających oraz niestaranego wykonywania iniekcji. Brak sku-

tecznego zabezpieczenia cięgien w konstrukcji powoduje, że mają do nich dostęp wilgoć oraz agresywne czynniki środowiskowe, takie jak np. chlorki. Badania wykazują, że stopień korozji zależy w dużym stopniu od stopnia wypełnienia kanału iniektem, rodzajem i jakością iniektu oraz dostępnością wilgoci.

Korozja cięgna może również wystąpić, gdy na całej długości cięgno jest dobrze otoczone zaczynem. Wtedy najczęstszą przyczyną korozji cięgna jest chlor występujący w zaczynie. Graniczna zawartość chlorków w stosunku do masy cementu w konstrukcjach sprężonych (w tym również w iniektie) nie powinna przekraczać 0,2%, jakkolwiek potencjalne zagrożenie przyspieszonej korozji stali sprężającej obserwowane jest już przy dużo mniejszej zawartości – rzędu 0,06 % w stosunku do masy cementu [9].

Istotny jest również stan cięgien sprężających zamontowanych w konstrukcji. Korozji sprzyja zanieczyszczenie spłotów np. wodą zawierająca wapno, gips, chlorki czy zanieczyszczenie ziemią. Czynnikiem sprzyjającym korozji jest również wartość naprężeń w stali sprężającej. W przypadku stali napiętej do 80% granicy plastyczności tempo korozji jest większe - o 10 ÷ 15 % (większy ubytek masy), niż w przypadku drutów nie naprężonych. Stwierdzono również, że kruche uszkodzenie drutów cięgien sprężających, wywołane przez korozję naprężeniową, obserwowane jest tylko w prętach napiętych powyżej 70% granicy plastyczności [9].

Korozja wpływa na właściwości mechaniczne stali sprężającej. Procesy korozyjne wpływają w znacznym stopniu na zmniejszenie wytrzymałości stali sprężającej oraz odkształcenia, przy których następuje zerwanie cięgien. Na rys. 10 pokazano krzywe naprężenie – odkształcenie dla spłotów o różnym stopniu korozji wg [5]. Można zauważyć, że przy ubytku korozyjnym 6,3% wytrzymałość spłotów spada o ok. 20%, przy prawie 5-krotnym zmniejszeniu odkształceń granicznych; natomiast przy korozji rzędu 20,4%, wytrzymałość wynosi tylko 38% wartości pierwotnej, przy czym nie jest już tak duże zmniejszenie odkształceń przy zerwaniu.



Rys. 10 Krzywe naprężenie-odkształcenie dla spłotów o różnym stopniu korozji [5]

3.2 Stan cięgien sprężających w chwili wbudowania oraz jakość kanałów kablowych

Badania wskazują, że istotny wpływ na przebieg i prędkość korozji ma stan kabli sprężających przed ich wbudowaniem i wykonaniem iniekcji. Brak prawidłowego składowania i transportu cięgien może prowadzić do korozji cięgien przed ich wbudowaniem. Już sama ekspozycja na wilgoć może być szkodliwa. Do uszkodzeń cięgien przed wbudowaniem dochodzi najczęściej, gdy sploty przechowywane są w ciasno zwiniętych spiralach. W czasie składowania i transportu może ponadto dochodzić do zabrudzenia środkami chemicznymi, nawozami, wodą zawierającą wapno lub gips, chlorkami, odpadami organicznymi, olejami. Sprzyja to powstawaniu ognisk korozyjnych, szczególnie w przypadku złej jakości iniektu i niestaranego iniektowania, np. braku prawidłowego odpowietrzenia iniektu czy jego zawilgocenie.

Istotna jest również jakość kanałów kablowych. Korozja cięgien sprężających rozpoczynająca się na skutek wad kanałów kablowych jest związana z ich zniszczeniem, nieprawidłowym wykonaniem styków lub korozją samych kanałów; w przypadku kanałów stalowych także ze zbyt małą grubością otuliny betonem, co może powodować korozję osłon. Najlepszą ochronę przed korozją stanowią osłony wykonane z tworzyw sztucznych, ponieważ wykonane są z materiału niekorodującego oraz są całkowicie nieprzepuszczalne dla czynników korozyjnych.

3.3 Korozja zakotwień






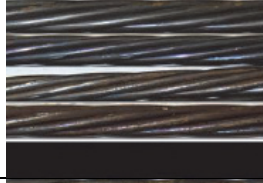
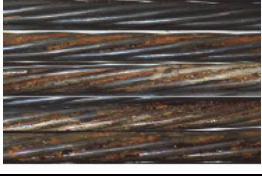
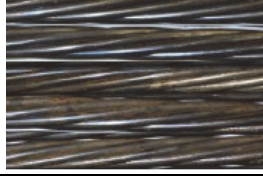
Korozja zakotwień może nastąpić na skutek niewłaściwej ochrony lub ich złej lokalizacji. Niewłaściwa ochrona to przede wszystkim zbyt mała otulina oraz zastosowanie przepuszczalnych materiałów do wypełnienia pustek w obszarze zakotwienia. Ważnym czynnikiem sprzyjającym korozji jest lokalizacja zakotwień. Najczęściej znajdują się one na końcach elementu, w miejscach gdzie znajdują się szczeliny dylatacyjne. Niedokładne wykonanie i brak starannego utrzymania urządzeń dylatacyjnych może prowadzić do bezpośredniego kontaktu strefy zakotwień z agresywnymi czynnikami środowiskowymi, takimi jak wilgoć i chlorki. W przypadku niekompletnego wypełnienia kanału kablowego iniektem korozja zakotwień może powodować przenikanie wilgoci i chlorków do kanałów kablowych. Korozja zakotwień może ponadto wywoływać zarysowanie i odłupywanie betonu otaczającego zakotwienie.

3.4 Czynniki związane z iniekcją kanałów kablowych

Istotny wpływ na przebieg korozji cięgien sprężających ma proces iniekcji kanałów kablowych. Dotyczy to zarówno jakości materiałów użytych do iniekcji, jak i procesu iniektowania.

Kluczowym czynnikiem chroniącym przed korozją jest maksymalne skrócenie czasu między sprężeniem a iniektowaniem. Zaleca się by czas ten wynosił maksymalnie od 7 do 40 w dni w zależności od wilgotności otoczenia. Jeżeli czas ten ma zostać przekroczony, należy wykonać tymczasowe zabezpieczenie antykorozyjne, np. pokrycie cięgien olejami rozpuszczalnymi w wodzie. W tabelicy 1 przedstawiono stan splotów przechowywanych w kanałach niewypełnionych iniektem, w różnych warunkach środowiskowych w czasie dziewięciu miesięcy.

Tab. 1 Porównanie stanu splotów w różnych warunkach środowiskowych [4]

	Przed oczyszczeniem	Po oczyszczeniu	Czas
Kanał suchy			1 tydzień 2 tygodnie 4 tygodnie 8 tygodni 9 miesięcy
Jeden koniec otwarty			1 tydzień 2 tygodnie 4 tygodnie 8 tygodni 9 miesięcy
Oba końce otwarte			1 tydzień 2 tygodnie 4 tygodnie 8 tygodni 9 miesięcy
Kanał zawilgocony			1 tydzień 2 tygodnie 4 tygodnie 8 tygodni 9 miesięcy

Istotny jest również sam proces prowadzenia iniekcji. Bezwzględna zasada jest iniektowanie kanałów kablowych od najniżej położonego miejsca i odpowiednie odpowietrzenie kanałów kablowych. Brak prawidłowego odpowietrzenia iniektu (zawarte w iniektcie powietrze przemieszcza się w kanałach kablowych, tworząc pęcherze – pustki w kanałach kablowych (gaz zawarty w iniektcie - powietrze lub wydzielający się z preparatu zwiększającego objętość iniektu – ekspansję, może gromadzić się w kanałach kablowych, tworząc pustki powie-

trza, sprzyjające korozji). Nawet najlepszej jakości zaczyn będzie nieskuteczny w przypadku nieprawidłowej techniki tłoczenia, braku odpowiednich wentyli odpowietrzających, itp.. Zabezpieczenie przed korozją ciągła przez iniekt jest nieskuteczne, jeśli kanał jest wypełniony tylko częściowo lub z przerwami. W takim przypadku mogą zachodzić silne procesy korozyjne (rys. 11, 12). Dodatkowo pustki i nieciągłości wypełnienia pozwalają na rozprzestrzenianie się wilgoci oraz chlorków na długości ciągła. Ogólnie rzecz ujmując, korozja kabli sprężających najbardziej się rozwija się, gdy ciągła są nieregularnie otoczone zaczynem. W tej sytuacji do korozji dochodzi z powodu różnic w parametrach fizycznych i chemicznych środowiska na długości ciągła. Mniej niebezpieczny, z punktu widzenia rozwoju korozji, może okazać się całkowity brak wypełnienia kanałów kablowych, niż kanały kablowe wypełnione w części.

Nieprawidłowe wypełnienie kanałów kablowych może być nie tylko związane z samym procesem iniekcji. Podstawowe przyczyny nieprawidłowego wypełnienia kanałów kablowych, nie związane bezpośrednio z procesem iniektowania to:

- niewłaściwe ukształtowanie kanałów kablowych,
- niedrożne lub uszkodzone kanały kablowe.

W przypadku konstrukcji kablobetonowych, duży wpływ na korozję kabli może mieć jakość zaczynu zastosowanego do iniekcji. Zbyt duży dodatek środków powodujących ekspansję iniektu w połączeniu z nieprawidłowym odpowietrzeniem kanałów kablowych (jako środek ekspansywny stosuje się z reguły aluminium, który w reakcji z betonem powoduje wydzielanie gazów, które mogą gromadzić się w formie pęcherzy). Ponadto nie przestrzeganie wymaganej proporcji w/c (woda/cement) powoduje, że jeśli cała woda dodana do iniektu nie wejdzie w reakcję z cementem, wtedy pozostanie jako wolna ciecz, która z braku możliwości odparowania będzie zawilgacać iniekt, sprzyjając powstawaniu elektrolitu, pozwalającego na rozwój korozji elektrochemicznej. Z tego też powodu tak ważne jest prawidłowe odpowietrzenie iniektu. Ponadto w przypadku nieprawidłowego doboru składników, struktura stwardniałego zaczynu może być nieprawidłowa.

Mokry iniekt to środowisko sprzyjające korozji elektrochemicznej (elektrolit), ale też zamarzająca woda prowadzi do rozsądzenia struktury iniektu (stwardniałego zaczynu cementowego).



Rys. 11. Przykład nieprawidłowego wypełnienia kanału kablowego iniektem
1 – pustka w górnej części kanału kablowego (brak całkowitego wypełnienia iniektem)
2 – nalot korozyjny na splotach oraz lokalne ogniska korozji; zaczyn iniekcyjny o lekko żółtej barwie; niewielka pustka bezpośrednio pod splotem



Rys. 12 Widok iniektu (w górnej, zaznaczonej części kanału kablowego) o nieprawidłowej strukturze i barwie, po usunięciu osłony kabla

Jako podsumowanie, w tablicy 2 zestawione przyczyny i wynikające z tego zagrożenia trwałości stali sprężających.

Tab. 2 Przyczyny i zagrożenia korozyjne dla stali sprężających [1]

Czynnik	Potencjale zagrożenie
Środowisko: <ul style="list-style-type: none"> - Sole do zimowego utrzymania dróg - Środowisko morskie - Gleby o dużej zawartości soli - Środki chemiczne (np. kwasy) - Dostęp wody do kanałów 	<ul style="list-style-type: none"> - źródło wilgoci i chlorków - źródło wilgoci i chlorków - źródło chlorków - kruchość wodorowa - źródło wilgoci
Materiały: <ul style="list-style-type: none"> - stale sprężające po obróbce termicznej - beton niskiej jakości - iniekt niskiej jakości - nietrwale osłony - materiały osłon podatne na korozję - zastosowanie różnych metali w elementach zakotwień 	<ul style="list-style-type: none"> - podatność na korozję naprężeniową i kruchość wodorową - niewystarczająca ochrona stali - tworzenie się pustek powietrznych, zawartości chlorków - brak ochrony przed korozją - ograniczona ochrona przed korozją - podatność na korozję elektrochemiczną
Błędy projektowe: <ul style="list-style-type: none"> - zbyt mała otulina - zbyt gęste zbrojenie - złe odwodnienie - lokalizacja styków - ochrona zakotwień - kanały kablowe - wentyle w kanałach 	<ul style="list-style-type: none"> - niewystarczająca ochrona stali - złe zagęszczenie betonu - gromadzenie się zasolonej wody - przecieki zasolonej wody - niedostateczna ochrona - nieciągłości i nieszczelności - brak wentyli prowadzi do niecałkowitego wypełnienia iniektem
Błędy wykonawcze: <ul style="list-style-type: none"> - niezapewniona otulina - zanieczyszczony lub zniszczony kanał kablowy - złe procedury iniekcji - zbyt długa przerwa między sprężeniem i iniekcją 	<ul style="list-style-type: none"> - niewystarczająca ochrona stali - niekompletne wypełnienie iniektem - niekompletne wypełnienie iniektem lub jego całkowity brak - możliwości rozpoczęcia procesów korozyjnych przed zabetonowaniem
Błędy w utrzymaniu: <ul style="list-style-type: none"> - szczeliny dylatacyjne - niedrożne lub uszkodzone odwodnienie 	<ul style="list-style-type: none"> - przecieki i gromadzenie się zasolonej wody - przecieki i gromadzenie się zasolonej wody

4. OCHRONA PRZED KOROZJĄ STALI SPRĘŻAJĄCYCH W NOWYCH KONSTRUKCJACH

Można wyróżnić trzy sposoby ochrony przed korozją cięgien sprężających:

- a) ochrona zapewniana przez beton,
- b) stosowanie środków zapobiegających wnikaniu chlorków do betonu,

c) bezpośrednie zabezpieczenie antykorozyjne stali sprężającej,

Dla elementów sprężających znajdujących się wewnątrz przekroju betonowego (strunobeton), jakość betonu jest najważniejszym czynnikiem odpowiedzialnym za trwałość, w tym za ochronę przed korozją. Właściwości ochronne zależą od cech fizycznych i chemicznych betonu oraz od poprawnego zaprojektowania i wykonania konstrukcji. Skuteczność ochronna betonu, w tym iniektu jest tym większa nim jest on bardziej szczelny (mniej przepuszczalny). Niska przenikalność spowolnia wnikanie wilgoci i chlorków. Przepuszczalność betonu (iniektu) można obniżyć zmniejszając w/c oraz przez stosowanie domieszek mineralnych, takich jak popiół lotny i krzemionka. Zredukowane w/c może wymagać stosowania domieszek redukujących wodę w zaczynie, a jednocześnie zapewniających jego odpowiednią płynność. Hamowanie korozji można uzyskać również przez dodawanie do betonu (zaczynu iniekcyjnego) inhibitorów korozji. Jednak wybór odpowiednich proporcji składników zaprawy i domieszek wymaga starannej analizy.

Istotne są także zabiegi zapobiegające wnikaniu chlorków do betonu, m.in. membrany wodoszczelne, powłoki oraz impregnacja betonu np. polimerami [6, 8].

W ramach bezpośredniego zabezpieczenia cięgien sprężających można stosować:

- a) powłoki epoksydowe – izolacja splotów od kontaktu z tlenem, wilgocią oraz agresywnymi czynnikami chemicznymi. Tak zabezpieczone cięgno o gładkiej powierzchni nadaje się do zastosowań, gdzie zespolenie nie jest konieczne, np. do sprężenia zewnętrznego, wieszaków lub want. Średnia grubość takiej powłoki 0,76mm (rys. 13),
- b) cynkowanie ogniowe – najbardziej efektywna ochrona metaliczna przed korozją – nie można jej jednak stosować w bezpośrednim kontakcie z betonem lub iniektem na bazie zaczynu cementowego.



Rys. 13. Zabezpieczenie splotów za pomocą żywicy epoksydowej [1]

Nowoczesną metodą ochrony jest stosowanie cięgien sprężających izolowanych elektrycznie [10]. W takich konstrukcjach stosuje się plastikowe osłonki kablowe. Dzięki temu zapewniona jest hermetyzacja systemu, co gwarantuje odizolowanie kabla od pozostałych elementów konstrukcji. Możliwy jest także

bieżący monitoring stanu kabli poprzez pomiar impedancji elektrycznej między kablem sprężającym a otaczającym go zbrojeniem miękkim. Każde istotne zmniejszenie oporu elektrycznego, które wskaże urządzenie pomiarowe, świadczy o uszkodzeniu bariery antykorozyjnej. System taki musi być przewidziany w konstrukcji w fazie projektowej, a kontrole należy rozpocząć już w fazie budowy.

5. METODY NAPRAW KONSTRUKCJI, W KTÓRYCH STWIERDZONO WYSTĘPOWANIE KOROZJI

Możliwe są następujące sposoby postępowania w przypadku wystąpienia korozji cięgien w elemencie sprężonym [1]:

- a) naprawa odłożona w czasie,
- b) uzupełnienie pustek w kanałach kablowych,
- c) wzmocnienie elementu lub całej konstrukcji,
- d) wymiana elementu lub całej konstrukcji.

Naprawa może zostać odłożona w czasie, tylko jeśli bieżący poziom występujących szkód jest akceptowalny i pewnym jest, że stopień korozji jest minimalny lub niski. Do czasu podjęcia prac naprawczych konstrukcja powinna być stale monitorowana, ponieważ tempo rozwoju korozji może ulegać znacznym zmianom w czasie. Należy również mieć na uwadze to, że koszty i trudność naprawy wzrastają wraz z odkładaniem jej na później.

Jeżeli stwierdzono istotne braki w wypełnieniu kanałów kablowych iniektem, można je uzupełnić w celu niedopuszczenia do przyszłej korozji. Należy zadbać o dobre właściwości zaczynu (m.in. niski stosunek w/c) oraz rozważyć zastosowanie inhibitorów korozji do mieszanki, jeśli procesy korozyjne już się rozpoczęły. Kluczowym elementem jest zapewnienie całkowitego otulenia spłotów iniektem – w tym celu kanały są często płukane wodą i przedmuchiwane sprężonym powietrzem przed tłoczeniem zaczynu.

W przypadku, gdy analiza obliczeniowa lub badania pod próbnym obciążeniem wskazują, że zniszczenia korozyjne spowodowały znaczny spadek nośności, konieczne jest wzmocnienie lub wymiana elementu (bądź całej konstrukcji). Można wybrać przykładowo wzmocnienie dodatkowym sprężeniem zewnętrznym lub dodanie zbrojenia biernego. Wymiana elementu (konstrukcji) to opcja ostateczna, tylko kiedy wzmocnienie jest nieekonomiczne.

Jedną z metod naprawczych dla stali jest także ochrona katodowa. Jeżeli iniekt jest zanieczyszczony chlorkami, ochrona katodowa może zostać zastosowana w celu zapobiegnięcia korozji stali. Do cięgien sprężających dołączona zostaje zewnętrzna anoda (protektor, ulegająca rozpadowi), a powierzchnia stali staje się katodą (ochrona bierna). Ochronę katodową można uzyskać stosując zewnętrzne źródło napięcia (ochrona czynna). Istnieją jednak istotne ograniczenia w stosowaniu ochrony katodowej, zwłaszcza czynnej, ponieważ użycie zbyt dużego napięcia może skutkować kruchością wodorową stali sprężającej. Ponad-

to osłony kablowe (zarówno stalowe, jak i z tworzyw sztucznych) działają jak izolator i istotnie zmniejszają skuteczność ochrony ciągną.

6. WNIOSKI

Jednym z istotnych elementów mających wpływ na trwałość konstrukcji sprężonych jest korozja cięgien sprężających. W tym kontekście kluczowym problemem jest skuteczna ochrona cięgien sprężających przed korozją. Prawidłowe rozwiązanie zabezpieczenia przed korozją kabli sprężających jest szczególnie trudne w konstrukcjach kablobetonowych, w których ciągną sprężające nie są osadzone w bloku betonowym, a w otwartych kanałach kablowych i następnie zabezpieczane przed korozją z reguły przez ich wypełnienie, na ogół zaczynem cementowym. Doświadczenie wskazuje, że prawidłowe wypełnienie kanałów kablowych jest kluczowym zabiegiem zapewniającym odpowiednią ochronę przed korozją. Dotyczy to zarówno rodzaju i jakości iniektu, jak i technologii iniektowania. Ponadto istotnym czynnikiem mającym wpływ na trwałość cięgien sprężających ma ich stan w chwili wbudowania oraz czas jaki upływa od momentu wbudowania i sprężenia do chwili wykonania iniekcji. Dlatego proces przygotowywania cięgien sprężających do wbudowania w konstrukcję, jak i ich zabezpieczania przed korozją musi być poddany rygorystycznej kontroli.

LITERATURA

1. ACI 222.2R-01, Corrosion of Prestressing Steels, ACI Committee 222, American Concrete Institute 2001.
2. Fumin L., Yingshu Y., Chun-Qing L., *Corrosion propagation of prestressing steel strands in concrete subject to chloride attack*, Construction and Building Materials 25/2011, str. 3878–3885.
3. Bruce S. M., McCarten P. S., Freitag S. A., Hasson L. M., *Deterioration of prestressed concrete bridge beams*, Land Transport New Zealand Research Report 337 2008.
4. Hutchison M. J., *Corrosion of post-tensioning strands in ungrouted ducts – unstressed condition*, Graduate Theses and Dissertations, University of South Florida 2013.
5. Lu Z.-H., Li F., Zhao Y.-G., *An investigation of degradation of mechanical behavior of prestressing strands subjected to chloride attacking*, 5th International Conference on Durability of Concrete Structures, Shenzhen University, China 2016.
6. Anderson M., Oliva M., Tejedor I., *Corrosion Protection and steel-concrete bond improvement of prestressing strand*, CFIRE Report 05-12, 2012.
7. Madaj A., Wołowicki W., *Budowa i utrzymanie mostów*, WKiŁ, Warszawa 2007.
8. Moawad M., El-Karmoty H, El Zanaty A: *Behavior of corroded bonded fully prestressed and conventional concrete beams*. Housing and Building National Research Center HBRC Journal, January 2016.
9. Nurberger U.: *Corrosion Induced Failures of Prestressing Steel*, Otto Graf Journal, vol. 13, 2012.

10. Piekarski J., *Elektrycznie izolowane cięgna sprężające – najbardziej zaawansowana technologia zabezpieczenia przed korozją*, Konferencja Naukowo – Techniczna Konstrukcje Sprężona, Kraków 2018.

CORROSION OF PRESTRESSING STEEL IN POST-TENSIONED STRUCTURES. CAUSES, EFFECTS, PREVENTION

Summary

The problem of prestressing steel corrosion becomes more and more relevant because of a significant amount of structures built in this technology in recent years. Corrosion of prestressing steel is particularly dangerous for there is no possibility of current control of the tendons and the destruction caused by corrosion is not preceded by any signs.

Corrosion of prestressing steel has usually irreversible effects and in some cases can lead even to a complete break of the tendon. The Authors present an example of a broken 31-strand tendon (steel strength 1860MPa), after only 10 years from the construction. Because of such serious failure the Authors analyzed their own experience and modern knowledge concerning causes, effects and prevention methods of corrosion of prestressing steel in post-tensioned structures.

In the paper the Authors discussed factors influencing prestressing steel corrosion, chemical processes connected with corrosion, its causes and effects. They also shown corrosion prevention methods in new structures as well as improvement methods for structures that are already damaged with corrosion.