

dr hab. inż. Arkadiusz Madaj, prof. PP^{1)*}
 ORCID: 0000-0002-6617-6290
 mgr inż. Katarzyna Mossor¹⁾
 ORCID: 0000-0002-1749-2529

Metody zabezpieczania kabli sprężających przed korozją

Methods of anti-corrosion protection of prestressing tendons in bridges

DOI: 10.15199/33.2020.04.03

Streszczenie. W artykule omówiono metody zabezpieczania kabli sprężających przed korozją przed ich wbudowaniem w konstrukcję oraz po wbudowaniu. Scharakteryzowano m.in. iniekcję zaczynem cementowym, woskami i smarami. Prawidłowe zabezpieczenie kabli sprężających przed korozją zwiększa trwałość mostów. Warto zauważyć, że światową tendencją jest odchylenie od iniekcji kanałów kablowych w mostach zaczynem cementowym na rzecz iniekcji smarami i woskami. Prowadzone są również badania nad poprawą odporności korozyjnej kabli sprężających, m.in. przez zastosowanie w produkcji stali nierdzewnej, czy bezpośrednie zabezpieczanie antykorozyjne drutów wykorzystywanych do produkcji splotów.

Słowa kluczowe: beton sprężony; ciągnio sprężające; korozja.

Abstract. In the paper the authors discuss methods of anti-corrosion protection before tendon installation and details concerning grouting – protection applied after installation. The authors describe details concerning cement grout, grouting with waxes, as well the grouting procedure itself. Durability of prestressed concrete structures is highly dependent on proper tendon anti-corrosion protection. It can be noticed that nowadays grouting with waxes is more common than cement grout. Research is also being done concerning production strands made of stainless steel or a direct anti-corrosion protection of steel that is used for strand production.

Keywords: prestressed concrete; prestressing tendon; corrosion.

Trwałość konstrukcji sprężonych zależy m.in. od skutecznego zabezpieczenia stali sprężającej przed korozją [7, 8]. W związku z tym istotne jest zabezpieczenie cięgien przed negatywnym oddziaływaniem środowiska bezpośrednio po ich wyprodukowaniu, podczas transportu, magazynowania na placu budowy oraz po wbudowaniu w konstrukcję (również przed wykonaniem iniekcji kanałów kablowych). Sploty powinny być fabrycznie chronione przed korozją, przez odpowiednie opakowanie i przechowywane w suchym, czystym, wentylowanym, a w razie konieczności klimatyzowanym miejscu. Trwałe zabezpieczenie cięgien sprężających realizowane jest na ogół po sprężeniu konstrukcji. W przypadku niektórych technologii sprężania możliwe jest zabezpieczenie kabli już w hucie, m.in. przez ich wyprodukowanie z materiału o odpowiednio dużej odporności na korozję.

Nie można dopuścić do rozwoju korozji na żadnym etapie wykonania konstrukcji. Kable dostarczone na plac budowy nie powinny wykazywać śladów korozji (fotografia). Dopuszczalne są jedynie naloty korozji łatwe do usunię-



Ogniska korozji na splotach wadliwie składowanych

Strand corrosion due to improper storage

cia za pomocą miękkiej tkaniny. Zanieczyszczenia cięgien (splotów) gruntem, odchodami zwierzęcymi, wodą zawierającą gips lub chlorki powinny być usunięte przed ich wbudowaniem w konstrukcję, ponieważ przyczyniają się do korozji wżerowej (*pitting*) i zmniejszenia nośności kabli, zwłaszcza naprężonych [1]. Jeżeli zachodzi konieczność, należy tymczasowo zabezpieczyć kable przed korozją np. za pomocą olejów rozpuszczalnych w wodzie. Istotnym problemem jest tymczasowe zabezpieczenie przed korozją stali sprężającej w pustych kanałach, jeszcze przed wykonaniem iniekcji. Badania istniejących konstrukcji oraz laboratoryjne wykazały, że skuteczną ochronę antykorozyjną na okres powyżej roku stanowi przedmuchiwanie kanałów kablowych suchym powietrzem lub azotem [5].

W przypadku zabezpieczenia stali sprężającej zaczynem cementowym, groźne jest niestaranne wykonanie iniekcji, gdyż powoduje niedokładne otoczenie kabli zaczynem, lub zastosowanie iniektu o różnych właściwościach [9]. Z badań wynika, że mniejsze prawdopodobieństwo wystąpienia przyspieszonej korozji zachodzi wówczas, gdy sploty nie są w ogóle zabezpieczone przed korozją niż, gdy mamy do czynienia z błędnie wykonanymi pracami.

W artykule omówiono metody zabezpieczania kabli wykonywanych z pojedynczych splotów tzw. kabli wielosplotowych (z pominięciem kabli linowych), stosowanych w konstrukcjach kablobetonowych, a więc takich, w których naciąg odbywa się po wykonaniu elementu betonowego.

Ochrona kabli przed korozją

Elementy obiektów mostowych są narażone na działanie wilgoci, zmiennej temperatury (np. spowodowanej promieniowaniem słonecznym) oraz chlorków stosowanych do zimowego utrzymania. Ochrona antykorozyjna cięgien zależy m.in. od:

- agresywności środowiska, w której eksploatowana jest konstrukcja;
- sposobu ekspozycji konstrukcji na oddziaływanie środowiska;

¹⁾ Politechnika Poznańska; Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu

^{*)} Adres do korespondencji: arkadiusz.madaj@put.poznan.pl

- liczby i rodzaju strukturalnego zabezpieczenia konstrukcji przed oddziaływaniem środowiska.

Na obniżenie wymagań dotyczących ochrony cięgien sprężających (kable) pozwala odpowiednie ukształtowanie konstrukcji oraz prawidłowe wyposażenie obiektu w odwodnienia i urządzenia dylatacyjne.

Zalecenia FIB [2] definiują **trzy poziomy zabezpieczenia cięgien przed korozją**:

- **PL1** – wypełnienie kanałów kablowych substancją zapewniającą trwałą ochronę cięgna przed korozją;

- **PL2** – tak jak poziom PL1 plus ciągła osłona kabla zapewniająca trwałą i pełną szczelność na całej długości cięgna;

- **PL3** – tak jak poziom PL2, ale z możliwością monitorowania i inspekcji stanu cięgien podczas eksploatacji konstrukcji.

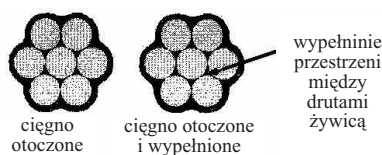
Sploty można zabezpieczyć przed korozją przed ich wbudowaniem w konstrukcję. Prace obejmują **zabezpieczenie poszczególnych drutów lub całych splotów**. Do pierwszej grupy można zaliczyć:

- wykonywanie drutów ze stali nierdzewnej;
- pokrywanie drutów warstwą cynku;
- pokrywanie drutów warstwą stali nierdzewnej lub miedzi.

Pokrywanie drutów warstwą cynku jest bardzo skuteczne, ale nie jest zalecane, jeżeli sploty mają bezpośredni kontakt z betonem lub zaczynem cementowym, gdyż środowisko o silnym odczynie alkalicznym prowadzi do szybkiego niszczenia powłoki. Badania [6] wykazały, że mimo iż opisane zabiegi skutecznie zabezpieczały przed korozją, to jedynie sploty wykonane z drutów pokrytych cynkiem na gorąco wykazywały wymagane właściwości mechaniczne. W przypadku pozostałych metod zabezpieczania stali przed korozją konieczne są dalsze badania.

Do zabezpieczania całych splotów (rysunek 1) stosuje się powłoki ochronne z:

- tworzywa sztucznego (polietylen lub polipropylen);
- żywicy (alternatywnie – wypełnienie struktury splotu żywicą).



Rys. 1. Zabezpieczenie splotów za pomocą żywicy epoksydowej

Fig. 2. Strands in epoxy-coating

Takie zabezpieczenie jest skuteczne, gdyż sploty nie mają kontaktu z tlenem, wilgocią oraz agresywnymi czynnikami chemicznymi. Cięgno o gładkiej powierzchni nadaje się do stosowania tam, gdzie nie jest konieczne zespolenie, np. do sprężenia zewnętrznego, wieszaków lub want oraz w przypadku cięgien o trasach prostoliniowych. Warunkiem skuteczności takiego zabezpieczenia jest jego całkowita szczelność (brak uszkodzeń mechanicznych).

Jedną z najpopularniejszych metod zabezpieczania kabli jest **iniekcja kanałów zaczynem cementowym**. Zaleca się ją w przypadku prowadzenia kabli po trasie krzywoliniowej lub łamanej. **Wyróżnia się iniekcję kanałów materiałami:**

- zapewniającymi zespolenie kabla z elementem konstrukcji (kable z „przyczepnością”);
- niezapewniającymi zespolenia kabla z elementem konstrukcji (kable „bez przyczepności”).

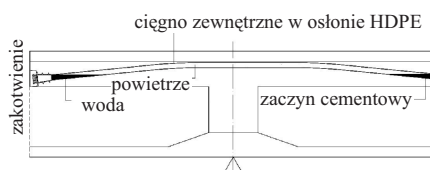
Zaczyn mający silny odczyn zasadowy prowadzi do pasywacji stali, skutecznie hamując korozję. O skuteczności metody decyduje:

- jakość i skład chemiczny zaczynu;
- prawidłowy sposób iniekcji;
- skuteczność wypełnienia kanałów;
- poprawne zaprojektowanie i wykonanie konstrukcji.

Bardziej szczelny (mniej przepuszczalny) zaczyn uniemożliwia i spowalnia wnikanie wilgoci oraz chlorków. Przepuszczalność iniektu można zmniejszyć obniżając stosunek w/c lub stosując domieszki mineralne, takie jak popioły lotne i krzemionka. W przypadku zmniejszenia w/c może być konieczne stosowanie domieszek redukujących wodę w zaczynie, a jednocześnie zapewniających jego odpowiednią płynność. Zahamowanie procesu korozji można uzyskać również przez dodanie inhibitorów korozji do zaczynu iniekcyjnego. Wybór odpowiednich proporcji składników zaczynu i domieszek wymaga starannej analizy.

Zbyt mała lub zbyt duża płynność iniektu prowadzić może do braku skutecznego otulenia cięgien lub powstawania pustek powietrznych, w których może gromadzić się wilgoć (woda) i tlen. Nierównomierne wypełnienie przestrzeni sprzyja korozji z powodu różnych właściwości fizycznych i chemicznych środowiska na długości cięgna. Jeżeli cięgno jest równomiernie otoczone zaczynem, wtedy o korozji decydują jego właściwości, np. zawartość chloru lub stan powierzchni splotów (np. występowanie zanieczyszczeń lub ognisk korozji). Niedopuszczalna jest iniekcja kanałów kablowych bez ich prawidłowego odpowietrzenia. Wentyle odpowietrzające powinny mieć średnicę co najmniej 14 – 15 mm i być umieszczone w najwyższych punktach, a iniekcja odbywać się od najniższego punktu kanału kablowego.

Szczegółnej staranności wymaga iniekcja cięgien zewnętrznych, które nie są dodatkowo zabezpieczone przez otaczający przekrój betonowy, a kanały wykonane są z reguły HDPE i są szczelne. Uniemożliwia to „naturalne” odpowietrzenie kanałów w czasie iniekcji, a także odparowanie nadmiaru wody z iniektu oraz wody pochodzącej z sedimentacji zaczynu (rysunek 2).



Rys. 2. Schemat styku powierzchni woda – powietrze i możliwe miejsca uszkodzenia

Fig. 2. Scheme showing the position of air – water interface and possible plane of rupture

Do iniekcji bez zespolenia stosowane są:

- mieszanki parafiny i wosku zawierające przeszło 30% oleju;
- czysta parafina;
- woski mikrokrystaliczne;
- wazelina – mieszanka parafiny i oleju;
- smar: mieszanina oleju i mydła z dodatkami substancji antykorozyjnych.

Woski i smary są produktami o dużej lepkości i dlatego powinny być podgrzane w celu zapewnienia skutecznej iniekcji. Ich temperatura powinna być o 30°C wyższa od punktu topnienia i wówczas



ARBOCEL – The Power of Progress

– włókna na bazie celulozy o charakterze mikrobrojającym, zagęszczającym oraz strukturotwórczym w produktach chemii budowlanej



Rettenmaier Polska
Sp. z o.o.
Bitwy Warszawskiej 1920 r. 7B
02-366 Warszawa
mobile +48 600 423 423
Tel + 48 22 608 51 00
e-mail: arbocel@jrs.pl

na skutek wymiany ciepła z konstrukcją nie dojedzie do tężenia. Temperatura podgrzania wynosi: 50 – 100°C w przypadku smaru i 90 – 120°C gdy stosujemy wosk. Preparaty tego typu kurczą się podczas schładzania i w efekcie dochodzi do powstawania pęknięć i pustek. Wosk ma bardzo dużą zdolność do zwilżania, co ułatwia całkowite pokrywanie powierzchni splotów. Prace iniekcyjne prowadzi się pod ciśnieniem. Podczas stosowania wosków wymagane jest mniejsze ciśnienie niż w przypadku smarów.

Do zabezpieczania stali sprężającej **nie zaleca się ochrony katodowej**. Istnieje ryzyko, że jeśli prąd polaryzacji będzie zbyt duży, to na powierzchni stali wytworzy się wodór atomowy, co może prowadzić do jej kruchości (HE). Większość badaczy zgadza się z poglądem, że zagrożenie kruchością wodorową (podatność na korozję naprężeniową – ang. SCC – *Stress Corrosion Cracking*) jest mniejsze, jeśli wartość potencjału katodowego wynosi przeszło 900 mVSCC.

W celu zminimalizowania zagrożenia wystąpienia korozji kabli konieczne jest skrócenie czasu między instalacją kabli (sprężeniem) a procesem iniekcji. Zaleca się, by wynosił on maksymalnie 7 – 40 dni w zależności od wilgotności otoczenia (im bardziej wilgotne środowisko, tym krótszy ten okres). W przeciwnym wypadku należy wykonać tymczasowe zabezpieczenie antykorozyjne splotów, np. przez pokrycie cięgien olejami rozpuszczalnymi w wodzie [1].

Podsumowanie

W Polsce powszechnie stosowane jest sprężanie dużych obiektów mostowych kablami bez przyczepności, o dużej nośności. Prawidłowe zabezpieczenie kabli sprężających przed korozją zwiększa trwałość mostów. Warto zauważyć,

że **światową tendencją w mostownictwie jest odchodzenie od iniekcji kanałów kablowych zaczynem cementowym na rzecz stosowania smarów i wosków** [4]. Prowadzone są również badania nad poprawą odporności korozyjnej kabli sprężających, m.in. przez wykorzystanie do produkcji stali nierdzewnej, czy bezpośrednie zabezpieczanie antykorozyjne drutów wykorzystywanych do produkcji splotów [3].

Literatura

- [1] ACI 222.2R-01. 2001. Corrosion of Prestressing Steels, ACI Committee 222. American Concrete Institute.
- [2] Durability of post-tensioning tendons, Bulletin 33 fib, December 2005.
- [3] Federal Highway Administration. 1998. Cathodic Protection Field Trials on Prestressed Concrete Components, Final Report., Publication No. FHWA-RD-97-153.
- [4] Godart B., J.-M. Lacombe, Ch. Aubagnac. 2015. Failures of external Tendons in Prestressed Concrete Bridges: Causes, Investigations, Remediation and Prevention. IABSE Conference – Structural Engineering: Providing Solutions to Global Challenges. September 23-25 2015, Geneva, Switzerland: 807 – 814.
- [5] Isecke B., J. Mietz, K. Schütt. 2003. „Temporärer Korrosionsschutz von Spannstählen in unverpressten Hüllrohren”. *Materials and Corrosion* 54: 413 – 418.
- [6] Kalina R. D., S. Mac Lean, J. F. Breen. 2011. Comparative Study of Mechanical and Corrosion Resistance Properties of Bridge Post-Tensioned Strands. Centre for Transportation Research at The University of Texas at Austin.
- [7] Madaj Arkadiusz, Katarzyna Mossor. 2018. „Korozja stali sprężającej w konstrukcjach kablobetonowych. Przyczyny, skutki, zapobieganie”. *Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej* nr 26/2018: 93 – 108. DOI: 10.21008/j.1897-4007.2018.26.08.
- [8] Madaj Arkadiusz, Katarzyna Mossor. 2019. „Awaria przesła dużego mostu sprężonego w wyniku korozji kabli sprężających”. *Mosty* 3-4: 32 – 35.
- [9] O'Reilly M., D. Darwin, J. Browning. 2012. Corrosion performance of prestressing strands in contact with dissimilar grouts. The University of Kansas Center for research, inc. Lawrence, Kansas.

Przyjęto do druku: 04.03.2020 r.

**Artykuły sponsorowane i reklamy
publikowane w miesięczniku
„Materiały Budowlane”
znajdują się**

w otwartym dostępie na stronie

www.materiałybudowlane.info.pl