

# Konstrukcje sprężone

## Cz. 1. Materiały i wykonanie prac

tekst: **dr. inż. PIOTR GWOŹDZIEWICZ**, Pracownia Konstrukcji Sprężonych, Instytut Materiałów i Konstrukcji Budowlanych, Politechnika Krakowska



Ryc. 1. Pylon z betonu sprężonego - wiadukt nad linią kolejową w ciągu ul. Reymonta w Opolu, fot. B. Karaś

## 1. Koncepcja sprężania

Historia sprężania, czyli celowego wprowadzania naprężeń w materiał, liczy wiele wieków. Dziś rzadko mówi się o tym, że koło roweru, dębowa beczka czy kamienny łuk są przykładami elementów sprężonych (ten ostatni wyłącznie wskutek wpływu ciężaru materiału). W inżynierii lądowej pojęcie sprężania odnosi się do konstrukcji budowlanych. Do sprężenia elementów konstrukcyjnych używa się przede wszystkim cięgien stalowych (stal sprężająca w postaci drutów, splotów i prętów) o wytrzymałości pomiędzy 1000 i 2000 MPa.

Taka technologia sprężenia jest rozwijana od ok. 80 lat. Choć trudno ją zatem nazwać technologią nowoczesnego budownictwa, ogromna popularność w ostatnim okresie powoduje, że wiele osób styka się z tą nową dla nich technologią po raz pierwszy i w swoich działaniach potrzebuje odpowiedniej o niej wiedzy. Podstawowym podręcznikiem w zakresie konstrukcji sprężonych w Polsce jest praca prof. Andrzeja Ajdukiewicza [1].

W ostatnich kilkunastu latach do wprowadzenia sił w konstrukcję używa się również materiałów kompozytowych zbrojonych włóknami. W przyszłości być może do sprężania będą wykorzystywane stopy z pamięcią kształtu, nad którymi obecnie prowadzone są badania. Każdy z wymienionych sposobów cechuje się określonym stopniem rozwoju standardów oraz własną charakterystyką. Niniejsza praca jest poświęcona wybranym zagadnieniom projektowym, obliczeniowym i wykonawczym konstrukcji sprężonych, związanym z rosnącym udziałem konstrukcji sprężonych w budownictwie.

## 2. Materiały w konstrukcjach sprężonych

W betonowych konstrukcjach sprężonych wykorzystuje się beton, stal zbrojeniową (jej opis zostanie pominięty) i stal sprężającą lub materiał kompozytowy zbrojony włóknami. Każdy z tych materiałów posiada cechy, które mają wpływ na pracę elementu sprężonego. Ponadto w konstrukcji stosuje się elementy armatury sprężania specyficzne dla danego systemu.

### 2.1. Beton

Cechy i wymagania dla betonu odnoszą się do normy EN-206. Od betonu w konstrukcji sprężonej oczekuje się wysokiej wytrzymałości na ściskanie i w zasadzie

nie dopuszcza się sprężania elementów z betonu o klasie niższej niż C30/37. Ma to związek w szczególności z konieczną, wysoką wytrzymałością betonu w strefie przekazywania siły sprężającej z zakotwień lub splotów na beton oraz w strefie oddziaływania reakcji. Choć mniej uwagi poświęca się zwykle kwestii rzeczywistej wartości modułu sprężystości podłużnej  $E_{cm}$ , jego znaczenie dla poprawnej pracy konstrukcji nie jest mniejsze – wpływa on na wielkość doraźnych odkształceń betonu. Występującą w wielu przypadkach w praktyce konsekwencją nadmiernych odkształceń betonu pod obciążeniem i sprężeniem są nadmierne ugięcia, częściej – nadmierne wygięcie, a także znaczne skrócenie elementu, którego skutkiem jest również nadmierny spadek siły sprężającej, jak też konieczność regulacji łożysk konstrukcyjnych. Dla otrzymania betonu o wysokim module sprężystości konieczne jest zastosowanie kruszywa łamanego, najlepiej bazaltowego. Z uwagi na prędkość wzrostu wytrzymałości, a także z uwagi na cechy fizykochemiczne (ewentualna agresywność wobec stali), istotny w konstrukcji sprężonej może być też wybór rodzaju cementu.

Rodzaj kruszywa jest jednym z parametrów istotnych również z uwagi na wielkość współczynnika pęcznienia, który powinien być niski. Poza kruszywem wpływ ma tu wybór cementu, proporcje mieszanki betonowej (zwykle zastępowane w obliczeniach wytrzymałością na ściskanie) oraz warunki dyfuzji wilgoci z betonu do otoczenia. Przyjmowana na etapie projektowym wartość współczynnika pęcznienia powinna zatem brać pod uwagę realia wykonawstwa, gdzie często trudno zakładać, że czas od zabetonowania do obciążenia elementu wyniesie co najmniej 28, a nierzadko nawet 14 dni. Z drugiej strony, decyzje na etapie budowy, pozwalające na szybszy postęp prac, powinny być podejmowane nie tylko na podstawie danych o wytrzymałości betonu na ściskanie, ale przede wszystkim analizy wpływu takich zmian na odkształcenia konstrukcji i ewentualną redystrybucję naprężeń między materiałami.

Szczelność, jednorodność i mrozoodporność betonu, układające się w zasadzie na poziomie lepszych wyników dla betonów wyższych klas, są tak jak i wytrzymałość betonu zależne od jego receptury, w szczególności wskaźnika w/c

oraz szczelności stosu kruszywa. W konstrukcjach sprężonych wymaga się ponadto dobrej przyczepności do stali oraz wysokiej wytrzymałości na docisk. Mimo że te ostatnie cechy są zależne od wielu czynników zarówno materiałowych, jak i wykonawczych (m.in. pielęgnacja), to zwykle nie przysparzają znaczących kłopotów w czasie budowy.

Podsumowując, zastosowanie w konstrukcji sprężonej betonu o cechach odpowiadających klasie określonej w normie EN-206 i nie niższej niż C30/37 pozwala uzyskać odpowiednie efekty, z zastrzeżeniem wykorzystania odpowiedniego rodzaju kruszywa, laboratoryjnej weryfikacji modułu sprężystości betonu oraz realizacji pełnego procesu dojrzewania betonu przed jego obciążeniem. Odpowiednia analiza zachowania betonu w konstrukcji sprężonej wymaga uwzględnienia kolejnych etapów wzrostu naprężeń, wpływu pęcznienia betonu na redystrybucję sił między materiałami oraz na odkształcenia konstrukcji. W przypadku konstrukcji wznoszonych etapowo wymaga to zwykle zbudowania złożonego modelu obliczeniowego konstrukcji. Tematyka obliczeń w tym zakresie zostanie omówiona w dalszej części niniejszej pracy.

### 2.2. Stal sprężająca

Stal sprężająca jest materiałem, którego charakterystyka – poprzez zastosowanie w wąskim zakresie sprężania konstrukcji – jest powszechnie mniej znana. Jednocześnie cechy stali sprężającej mają kluczowe znaczenie dla powodzenia i trwałości sprężenia.



Ryc. 2. Kable sprężające złożone ze splotów, fot. B. Karaś



Stal sprężająca jest produkowana w postaci drutów oraz prętów. Druty są wykorzystywane zarówno w postaci niezmiętej, jak i skręcone w sploty. Technologia produkcji obu rodzajów wyrobów przedstawia się następująco:

1. Druty produkuje się ze stali wysokowęglowej, walcówki, o wytrzymałości ok. 1000 MPa. Po uzyskaniu drutu w hucie poddaje się go procesowi tzw. przeciągania na zimno, który pozwala na redukcję średnicy drutu. Proces ten powoduje znakomite zwiększenie wytrzymałości stali na rozciąganie, czyniąc ją jednakże jednocześnie stosunkowo wrażliwą na obciążenie poprzeczne. Ostateczna średnica drutu wynosi od 2 do 5 mm. Stal przeciągana na zimno jest wrażliwa na korozję naprężeniową i chemiczną, a przy wzroście temperatur powyżej 500 °C stopniowemu obniżeniu podlegają jej cechy wytrzymałościowe, stąd wrażliwość tej stali na zetknięcie się z temperaturą spawania. Przeciąganie na zimno pozwala uzyskać wytrzymałość na poziomie 1570–1860 MPa. W niewielkich ilościach produkuje się też obecnie drut sprężający o wytrzymałości na poziomie 2160 MPa, a przewiduje się, że w przyszłości będzie stosowana stal o wytrzymałości sięgającej 2500 MPa. W praktyce najczęściej stosuje się drut sprężający o wytrzymałości 1860 MPa oraz – rzadziej – 1770 MPa.

Z uzyskanego drutu sprężającego można w kolejnym etapie uzyskać splot sprężający (ryc. 2), lecz ta operacja nie zmienia już cech drutu. Powierzchnia drutu sprężającego jest gładka, może też być nagniatana na zimno.

2. Jako stopowa stal walcowana na gorąco. Walcowanie pozwala uzyskać bezpośrednio docelową średnicę oraz gwint na powierzchni zewnętrznej pręta, konieczny do jego późniejszego naciągu i kotwienia. Po walcowaniu pręty poddawane są termicznej obróbce, mającej na celu wyrównanie wytrzymałości i eliminację naprężeń lokalnych. Walcowane średnice mieszczą się zwykle w zakresie pomiędzy 15 mm i 65 mm, a wytrzymałość stali wynosi 1030–1050 MPa. Pręty dostarcza się w odcinkach prostych. Pręty sprężające są bardziej odporne zarówno mechanicznie – również na docisk poprzeczny – jak i na korozję oraz wpływ podwyższonych temperatur.

Splot sprężający składa się z dwóch, trzech lub siedmiu (najczęściej) drutów, skręconych w wytwórni w taki sposób,

że po przecięciu druty się nie rozkręcają. Niespełnienie tej zasady, jak też obecność przerw w drutach tworzących splot uniemożliwiają użycie splotu do sprężania. Uzyskane sploty są zwijane w kręgi o średnicy do 170 cm i masie do ok. 3,5 t.

Badania cech stali sprężającej odbywają się w laboratorium współpracującym z wytwórnią. Dowodem takich badań jest dostarczany wraz z dostawą stali dokument atestu, zawierający w szczególności wyniki badań następujących cech: składu chemicznego, pola przekroju splotu, siły zrywającej, wytrzymałości na rozciąganie, siły oraz naprężenia dla umownej granicy plastyczności 0,1% oraz 0,2%, wydłużenia w procentach na bazie 500 mm, modułu sprężystości oraz ciężaru jednostkowego. Atest zawiera też wykresy dla badanych próbek i opracowanie statystyczne uzyskanych wyników. Zważywszy, że stosowany w naszym kraju materiał pochodzi w zasadzie wyłącznie od uznanych producentów, spełnienie wymagań dla stali sprężającej zwykle jest pełne.

Do podstawowych cech wytrzymałościowych stali sprężającej istotne z punktu widzenia projektowania są: wytrzymałość, granica plastyczności oraz moduł sprężystości. Stal sprężająca to materiał liniowo-sprężysty do uplastycznienia, a następnie sprężysto-plastyczny. Do obliczeń przyjmuje się uproszczoną formę wykresu naprężenie – odkształcenie. W obliczeniach prowadzonych według EC2 można przyjąć wykres tam zamieszczony. Ważnym wymaganiem dla stali jest, by granica plastyczności znajdowała się wysoko w porównaniu do wytrzymałości. Dla drutów i splotów granica plastyczności 0,1% musi spełniać warunek  $f_{p0,1k} \geq 0,9f_{pk}$ . Dla prętów wymaga się, by granica plastyczności wynosiła co najmniej 900 MPa.

Dodatkowo producent stali sprężającej prowadzi okresowe badania relaksacji, badania zmęczeniowe materiału oraz badania odporności na korozję naprężeniową w środowisku agresywnym NH4SCN. Od stali sprężającej wymaga się niskiej relaksacji pod obciążeniem. Próba relaksacji polega na długotrwałym obciążeniu odcinka stali działaniem stałego odkształcenia oraz obserwacji poziomu naprężeń. Dla stali sprężającej w postaci splotów obecnie oczekuje się relaksacji niższej od 2,5% przy początkowym poziomie naprężeń  $0,7 f_{pk}$ . Stosowana obecnie stal sprężająca nie wymaga wykonywanego wcześniej przecią-

gania, którego celem było jeszcze w latach 70. XX w. obniżenie późniejszego wpływu relaksacji w konstrukcji. Zawierające takie zalecenie zapisy niektórych specyfikacji technicznych nie powinny być stosowane i należy je z tych dokumentów sukcesywnie usuwać.

### 3. Rodzaje stalowych cięgien sprężających

Opisane powyżej rodzaje stali sprężającej pozwalają na budowę wielu typów cięgien. Z uwagi na swoją budowę i podstawową charakterystykę cięgna sprężające dzieli się na kable sprężające, struny (stosowane w strunobetonie) i pręty sprężające. Kable sprężające buduje się z drutów równoległych lub – częściej – ze splotów. Kable złożone z drutów stosowane są w szczególnych przypadkach, zwłaszcza tam, gdzie niewielka długość cięgna wyklucza użycie zakotwień z poslizgiem. Najbardziej powszechnie stosowanym rodzajem cięgna sprężającego jest obecnie cięgno złożone z 1 do 31 splotów. Pręty sprężające są wykorzystywane do wszelkiego rodzaju tymczasowych i trwałych mocowań i kotwień elementów konstrukcji (połączenia elementów stalowych i betonowych) oraz do sprężenia krótkich elementów nośnych.

### 4. Cięgna z materiałów kompozytowych zbrojonych włóknami

Od kilkunastu lat rozwijane są technologie związane z zastosowaniem materiałów kompozytowych zbrojonych włóknami w konstrukcjach budowlanych. Początkowo zastosowania ograniczały się do przyklejenia taśm i mat w stanie nie-naprężonym do konstrukcji, następnie podjęto próby dokonania wstępnego naciągu taśm przed ich przyklejeniem. Najbardziej popularnym typem cięgna jest taśma o szerokości ok. 60 mm i grubości ok. 2,4 mm, zbrojona włóknami węglowymi. Jej wytrzymałość sięga 2400 MPa, z czego w trakcie sprężania wykorzystuje się maksymalnie ok. 55%. Cięgna tego typu są wykonywane z pojedynczych taśm, nie stosuje się obecnie cięgien złożonych z większej ich liczby.

Wspólną cechą cięgien kompozytowych jest ich niewielka odporność na uszkodzenia mechaniczne oraz na podwyższoną temperaturę. Z uwagi na miejsce montażu – powierzchnia wzmacnianej konstrukcji – zastosowanie tej technologii może wymagać dodatkowego zabezpieczenia

mechanicznego lub termicznego. Z drugiej jednak strony należy podkreślić, że zarówno z uwagi na ilość zajmowanego miejsca, jak i na walory estetyczne ciągną z taśm kompozytowych mogą mieć w niektórych przypadkach przewagę nad ciągnami stalowymi.

## 5. Dodatkowe elementy ciągnię sprężających

Do wykonania sprężenia elementu kałobetonowego ciągnami stalowymi konieczne jest użycie następującego zestawu elementów i rozwiązań dotyczących kabli, określanych zwykle jako armatura sprężająca:

- osłonki kanałów kablowych,
- zakotwienia kabli,
- odpowietrzenia kanałów kablowych.

### 5.1. Osłonki kanałów kablowych

Osłonki kanałów kablowych są wykonywane z blachy stalowej (ryc. 3) lub – znacznie rzadziej – z tworzyw sztucznych (PE). Osłonki stalowe zapewniają najpierw przesuw ciągną w kanale w trakcie naciągu, a następnie współpracę ciągną z otaczającym betonem dzięki przyczepności. Osłonki z tworzyw sztucznych zapewniają izolację ciągnię od prądów błędzących, a także dodatkową ochronę antykorozyjną.

Osłonki stalowe są wykonywane z paska blachy o szerokości 30 mm i grubości od 0,3 do 0,5 mm, spiralnie skręcanego w maszynie. Gotowy odcinek rury powinien być szczelny i odporny na operowanie nim w trakcie montażu w zbrojeniu na budowie. Osłonki kanałów kablowych poddaje się badaniom na szczelność i wytrzymałość na zginanie.

Osłonki posiadają średnice dopasowane do przekroju poprzecznego kabla. Dla kabli złożonych ze splotów przeciętne wypełnienie przekroju kanału stałą wynosi 1/3.

Z uwagi na ciężar stali sprężającej włożonej do kanału przed betonowaniem lub siły wyporu działającej na pusty kanał



Ryc. 3. Osłonki kabli w szalunku, fot. P. Gwoździwicz

w trakcie wibrowania mieszanki betonowej, osłonki mocuje się do zbrojenia w rozstawach do 1,5 m. Połączenia odcinków rury, wykonane na mufy, uszczelnia się taśmą. Montaż osłonek w szalunku w sąsiedztwie znacznie sztywniejszych prętów zbrojeniowych, a następnie betonowanie elementu wymagają ostrożności od wykonawców tych prac, której brak może spowodować zniekształcenie lub rozszczelnienie kanału kablowego.

### 5.2. Zakotwienia ciągnię stalowych

Zakotwienia są elementem, wobec którego stawia się bardzo wysokie wymagania dotyczące wytrzymałości i dokładności wykonania. To właśnie te elementy są na wniosek producenta objęte europejską aprobatą techniczną i regularnie poddawane kontroli w ramach nadzoru nad certyfikatem zgodności. Ich produkcja jest objęta ścisłym planem zapewnienia jakości.

Zakotwienia powinny pozwolić na dokonanie naciągu kabli, ich zakotwienie oraz utrzymanie siły sprężającej przez cały okres eksploatacji. Obecnie najczęściej stosuje się zakotwienia szczękowe, zakotwienia z zaciskami plastycznymi oraz zakotwienia wgłębne.

Zakotwienia szczękowe mogą pełnić rolę zakotwień czynnych (ryc. 4) oraz biernych (ryc. 5). Składają się ze stalowego walca z układem przelotowych otworów stożkowych. Liczba otworów odpowiada maksymalnej liczbie splotów w kablu. Splot sprężający jest otoczony stożkową szczęką dwu- lub trójdzielną (w zależności od systemu). Zakotwienia biernie są wyposażone w stalowe sprężyny, oparte na stalowej blasze i wypychające szczęki w otwory. Bloki zakotwień opierają się na powierzchni bloku oporowego, umieszczonego w konstrukcji przed betonowaniem. Rozmiary i kształt bloku oporowego w różnych systemach są zróżnicowane, mają jednak zapewniać bezpieczne przeniesienie na beton maksymalnej siły, jaka może wystąpić w kablu sprężającym. Zakotwienia wraz z blokami oporowymi podlegają szczegółowym badaniom dopuszczeniowym w laboratorium. Dodatkowa wartość niektórych stosowanych rozwiązań – stopień rozbudowania bloku oporowego, jego rozmiary, liczba kołnierzy przekazujących siłę na beton – pozwala zapewnić większy zapas bezpieczeństwa. Warto zauważyć, że stopniowa rozbudowa bloków oporowych w wielu systemach i zmiana ich kształtu z klinowego na walcowy, wyposażony w kilka pierścieni, jest pomocna szczególnie w przypadku nie-

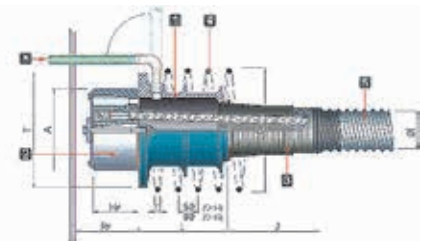


Ryc. 4. Zakotwienie czynne szczękowe wraz z blokiem oporowym, odpowietrznikiem oraz początkiem osłony kanału kablowego

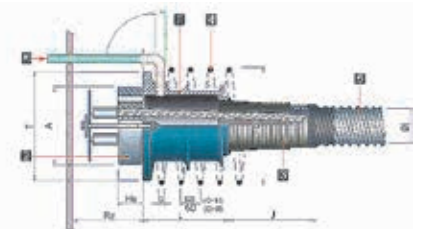
doskonałości betonu ułożonego w skądinąd trudnej do zabetonowania strefie w sąsiedztwie zakotwień.

Specyficzną cechą zakotwień szczękowych jest występujący w trakcie kotwienia ciągnię ich poślizg. W kablach o długości powyżej 20 m, w szczególności przy trasie zakrzywionej, poślizg nie ma wielkiego wpływu na efektywną siłę sprężającą w elemencie. W ciągnach krótkich i prostych poślizg może jednak znacząco zredukować efekt naciągu.

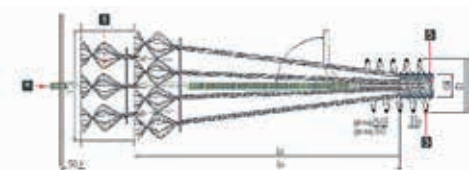
Zakotwienia z zaciskami plastycznymi (ryc. 6) pozwalają zniwelować poślizg ciągnię w trakcie kotwienia. Zacisk plastyczny jest wykonywany ze stalowej tulei przy użyciu prasy do zacisków i oparty na zakotwieniu w postaci walca z szeregiem równoległych otworów walcowych. Zako-



Ryc. 5. Przekrój zakotwienia biernego szczękowego



Ryc. 6. Przekrój zakotwienia biernego z zaciskami plastycznymi



Ryc. 7. Zakotwienie biernie przyczepnościowe





Ryc. 8. Złożone z blach stalowych zakotwienie taśm sprężających CFRP w trakcie naciągu ciężna, fot. W. Derkowski



Ryc. 9. Zakotwienie taśmy sprężającej nowej generacji, fot. dzięki uprzejmości Sika oraz StressHead

twienie czynne jest wyposażone dodatkowo w zewnętrzny gwint, pozwalający na regulację siły w ciężnie.

Zakotwienia wgłębne przyczepnościowe (ryc. 7) wykorzystują przyczepność betonu do stali. Dla zwiększenia ich wydajności stosuje się rozploty końcówki splotów stabilizowane dodatkowymi wkładkami zbrojenia. Zastosowanie zakotwienia przyczepnościowego wymaga bardzo dobrego zagęszczenia mieszanki betonowej w strefie otaczającej zakotwienie.

Wszystkie rodzaje zakotwień podlegają bardzo szczegółowym badaniom przed dopuszczeniem do stosowania. Badania te obejmują zarówno nośność samych zakotwień, jak i odpowiednio zbrojonej betonowej strefy sąsiadującej. Wydanie europejskiej aprobaty technicznej potwierdza przeprowadzenie wymaganych badań. Zastosowanie zakotwień w Polsce wymaga zwykle przedstawienia ścisłego tłumaczenia aprobaty, dokonanego w odpowiednim języku technicznym, które jest czytelne i pozwala zapoznać się z charakterystyką systemu. Ponadto konieczne jest

przedstawienie kopii certyfikatu zgodności CE, wydanego przez uprawnioną do tego jednostkę.

### 5.3. Zakotwienia z kompozytowych taśm sprężających

Zakotwienia ciężgien z materiałów kompozytowych są znacznie bardziej różnorodnymi rozwiązaniami i są dostosowane do danego sposobu ich naciągu. Najstarszym stosowanym w Polsce rozwiązaniem jest zakotwienie złożone ze stalowych płyt skręcanych śrubami (ryc. 8), zastosowane w czasie pierwszej aplikacji takiego rozwiązania w praktyce budowlanej w Polsce w 2004 r. [2]. Od tego czasu rozwijane są różne rodzaje zakotwień, oparte na sile tarcia między taśmą a blachami zakotwienia, na sile tarcia oraz siłach docisku do sworzni oraz na sile tarcia między taśmą a szczękami zakotwienia z tworzyw sztucznych (ryc. 9). Rozwiązania zakotwień tego rodzaju nie doczekały się dotychczas ścisłych regulacji zasad ich zastosowania i jedynie wiodący producenci legitymują się obecnie szerokimi rezultatami badań oraz wystawianymi certyfikatami materiałowymi.

### 5.4. Odpowietrzniki kanału kablowego

Dla zapewnienia ucieczki powietrza z kanałów w trakcie iniekcji i szczelnego ich wypełnienia zaczynem cementowym w blokach oporowych oraz na długości kanałów stosuje się odpowietrzenia (ryc. 10 i 11). Do wykonania odpowietrzeń używa się polietylenowej armatury nakładanej na osłonkę kanału i wyprowadzonej na zewnątrz elementu.

## 6. Urządzenia do wykonania prac

### 6.1. Urządzenia naciągowe (prasy, naciągarki)

Urządzenia te są dostosowane do rodzaju zakotwienia i różnią się między systemami kształtem i wymiarem. Wspólną cechą jest sposób ich pracy – są to urządzenia hydrauliczne, osiągnące ciśnienia na poziomie ok. 700 b – oraz konieczność regularnego ich cechowania (nie rzadziej niż co sześć miesięcy). Poza urządzeniami naciagowymi (ryc. 12) do wykonania naciągu są konieczne pompy hydrauliczne wraz z przewodami oraz urządzenia dodatkowe, pozwalające rozkotwić naciągnięte ciężno, jeśli okaże się to konieczne.

### 6.2. Iniektarki

Kanały kablowe zwykle wypełnia się zaczynem cementowym, rzadziej materiałami trwale plastycznymi. Istotnym elementem



Ryc. 10. Widok czoła konstrukcji z otworami odpowietrzników powyżej zakotwień, fot. P. Gwoździewicz



Ryc. 11. Widok rurki odpowietrzającej kanał kablowy na końcu konstrukcji, wypływający spieniony zaczyn cementowy, fot. P. Gwoździewicz



Ryc. 12. Prasa naciągowa w trakcie nakładania na końcówkę kabla, fot. P. Gwoździewicz



wyposażenia w trakcie sprężania konstrukcji są zatem urządzenia do przeprowadzenia cementowej iniekcji kanałów kablowych. Oczekiwana jednorodność zaczynu i konieczne odpowiednie tempo pompowania wymagają, aby urządzenia do iniekcji pozwalały na systematyczną produkcję zaczynu oraz jego nieprzerwane pompowanie do kanału. Prawidłowy zestaw do iniekcji składa się ze zbiornika do wstępnego mieszania składników, mieszarki szybkoobrotowej rozbijającej mieszaninę do konsystencji żelu oraz zbiornika do pobierania mieszanki (ryc. 13). Zastosowanie takich urządzeń pozwala wykonać iniekcję zgodnie z wymaganiami, w szczególności dotyczącymi ograniczeń płynności zaczynu, jego sedymentacji i zmiany objętości, a także wytrzymałości na ściskanie.

Warunki do prowadzenia iniekcji przede wszystkim nawiązują do postulatu, według którego w trakcie wiązania i aż do momentu uzyskania mrozoodpor-



Ryc. 13. Zbiornik zaczynu cementowego do iniekcji

ności zaczynu nie może być narażony na zamarzanie. Przyjmuje się, że minimalna temperatura prowadzenia iniekcji wynosi  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$  przy jednoczesnej prognozie wykluczającej mróz przez następne 24 godziny. W razie konieczności wykonania iniekcji w niesprzyjających warunkach temperaturowych konieczne jest przykrycie i ogrzewanie obiektu oraz stanowiska prowadzonej iniekcji.

## 7. Badania w czasie wykonywania prac

Należące do technologii sprężania badania dzieli się na dwie grupy: badania w trakcie naciągu cięgien i badania w czasie prowadzenia iniekcji.

W trakcie naciągu cięgien celem badań jest potwierdzenie, że siła wprowadzona w konstrukcję uzyskuje zaplanowaną wcześniej wartość oraz że jej rozkład na długości cięgna z techniczną dokładnością odpowiada obliczeniom. W tym celu przede wszystkim prowadzi się kontrolę

ciśnienia oleju w układzie hydraulicznym i opierając się na tablicy cechowania zestawu naciągowego, określa się na bieżąco siłę w ciągnięciu w miejscu naciągu. Jednocześnie prowadzi się etapowy pomiar wydłużenia cięgna, które poprzez swój związek potwierdza zgodność rozkładu siły na długości kabla. Ostatnim z pomiarów dla każdego cięgna jest pomiar poślizgu szczęk w zakotwieniach, który wykonuje się pośrednio przez pomiar ruchu tłoka naciągowego prasy w czasie redukcji ciśnienia. Wszystkie wyniki pomiarów są umieszczane niezwłocznie w sposób trwały w dziennikach sprężania, które podlegają pełnej archiwizacji.

Badania w trakcie iniekcji mają za zadanie potwierdzić jakość wypełnienia kanałów kablowych, która jest decydująca z uwagi na trwałość sprężenia. Wielokrotnie powtarzaną próbą w trakcie prowadzenia iniekcji jest kontrola płynności zaczynu metodą lejka Moerscha lub walca Sontharda. W trakcie prowadzenia iniekcji pobiera się także próbki do badania stabilności zaczynu, rozumianej jako ograniczone oddzielenie wody (ograniczenie do 2%), oraz do badania zmiany objętości (-2%; +0,5%). Kontrolę wytrzymałości zaczynu iniekcijnego na ściskanie wykonuje się na 12 próbkach pobieranych w trakcie iniekcji i składowanych równocześnie w wodzie i w warunkach konstrukcji. Wymaga się, by średnia wytrzymałość na ściskanie nie była niższa niż odpowiednio: po siedmiu dniach – 26 MPa, po 28 dniach – 30 MPa. Choć prowadzenie iniekcji kanałów kablowych jest pozornie mniej ciekawym etapem sprężania konstrukcji, to prawidłowe jej wykonanie wraz z przeprowadzeniem badań jest konieczne dla pełnego zabezpieczenia trwałości wykonywanej konstrukcji.

Od budowanych obecnie konstrukcji (Ryc. 15-18) oczekuje się trwałości co najmniej stuletniej.

## Literatura

- [1] Ajdukiewicz A., Mames J.: *Konstrukcje z betonu sprężonego*. Stowarzyszenie Producentów Cementu. Kraków 2008.
- [2] Seruga A., Derkowski W., Faustmann D., Kaźmierczak S., Szydłowski R., Zych M.: *Wzmocnienie żelbetowej konstrukcji przykrycia hali produkcyjnej*. „Inżynieria i Budownictwo” 2009, nr 4.

Artykuł recenzowany zgodnie z wytycznymi MNiSW.



Ryc. 14. Most przez Nysę Kłodzką w ciągu DK94 w Skorogoszczu, fot. T. Miernik



Ryc. 15. Kładka pieszo-jezdna przez potok Stomka w Budzowie, fot. P. Gwoździwicz



Ryc. 16. Wiadukt w ciągu ul. Wita Stwosza w Krakowie, fot. P. Gwoździwicz



Ryc. 17. Most w ciągu S69 w Miłowce, fot. P. Gwoździwicz



Ryc. 18. Silos na klinkier w Cementowni Góraždze, fot. P. Gwoździwicz