

## Bibliografia

- [1] T. Brzeski, R. Rippel: *Jet grouting*, „Inżynier budownictwa” 05/2009
- [2] P. Rychlewski: *Kolumny DSM*, „Inżynier budownictwa” 02/2013
- [3] Katalog Detali Mostowych, opracowany przez GDDKiA, 2002
- [4] PN-EN ISO-1461 Powłoki cynkowe nanoszone na stal metodą zanurzeniową (cynkowanie jednostkowe) – wymagania i badania
- [5] PN-85/S-10030. Obiekty mostowe. Obciążenia
- [6] Wytyczne stosowania drogowych barier ochronnych na drogach krajowych, Załącznik do Zarządzenia Nr 31 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 23.04.2010 r., GDDKiA ■

*Uczestnik projektu „Kwalifikacje dla rynku pracy – Politechnika Lubelska przyjazna dla pracodawcy” współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.*

*Participant of the project: „Qualifications for the labour market – employer friendly university”, cofinanced by European Union from European Social Fund.*



**KRZYSZTOF  
ŚLEDZIEWSKI**

Politechnika Lubelska  
k.sledziewski@pollub.pl

## Nowości w projektowaniu mostowych konstrukcji zespolonych stalowo-betonowych

Mimo że od kilkudziesięciu lat są budowane w Polsce obiekty mostowe o konstrukcji zespolonej [1], to dotychczas nie było krajowej normy regulującej procedurę ich projektowania. Stąd też części betonowe (żelbetowe lub sprężone) projektowano według normy projektowania mostów betonowych [10], natomiast części stalowe według normy projektowania mostów stalowych [9].

Sytuacja uległa zmianie, gdy Normy Europejskie (EN), opracowane przez Europejski Komitet Normalizacyjny (CEN – *European Committee for Standardization*) uzyskały, bez wprowadzania jakichkolwiek zmian, status norm krajowych (PN-EN). W związku z tym członkowie CEN, a wśród nich Polski Komitet Normalizacyjny, zostali zobowiązani do wycofania norm krajowych, sprzecznych z normami EN do dnia 31 marca 2010 r.

Oznacza to, że mosty zespolone typu stal – beton należy obecnie projektować i budować zgodnie z PN-EN 1994-2 Eurokod 4: Projektowanie konstrukcji zespolonych stalowo-betonowych, Część 2: Reguły ogólne i reguły dla mostów [3].

W artykule przedstawiono proces wdrażania Eurokodów do praktyki projektowej i pierwsze oceny wynikające z ich konfrontacji ze starymi krajowymi normami projektowania PN-B. Zwrócono szczególną uwagę na różnice między dotychczasową praktyką projektowania mostów zespolonych w Polsce a obecnymi zasadami i regułami projektowania zgodnie z Eurokodem 4.

### Wdrażanie Eurokodów do praktyki

Wdrażanie Eurokodów do praktyki w Polsce zaczęło się już w latach 90. ubiegłego wieku, od informacji przedstawianych w referatach (głównie pracowników ITB), na ogólnopolskich konferencjach [5]. W ITB podjęto się tłumaczenia opracowanych przez CEN tzw. prenorm pierwszych części poszczególnych Eurokodów (oznaczonych jako ENV), które miały

być stosowane w poszczególnych państwach członkowskich na równi z normami krajowymi. Obowiązująca wówczas ustawa o normalizacji, w przeciwieństwie do CEN nie przewidywała jednak „próbnego stosowania” ENV w Polsce. Należy również wspomnieć o działalności IBDiM, który na zlecenie GDDKiA oraz PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. opracowywał tłumaczenie wstępnych norm mostowych wraz z załącznikami krajowymi i komentarzami ułatwiającymi ich stosowanie, niestety nie zostały one szerzej wprowadzone. Niemniej administracja drogowa, jak i kolejowa dysponowała już od początku lat dziewięćdziesiątych tymi materiałami dotyczącymi obiektów mostowych.

Z informacji nadchodzących z CEN wiadomo było, że zmiany w EC/EN w stosunku do ENV miały nie dotyczyć zasad, a jedynie szczegółów. Dodatkowo sama koncepcja zapewnienia bezpieczeństwa konstrukcji przyjęta w EC/EN była identyczna z przyjętą w naszych przepisach. Pozwoliło to podjąć decyzję o przekształceniu aktualnie stosowanych PN-B projektowania konstrukcji, wprowadzając większość postanowień Eurokodów, już z odpowiednimi oznaczeniami i terminologią.

W ten sposób powstały normy „pomostowe”, które stały się bardzo ważnym elementem w procesie wdrażania Eurokodów [4]. Ich rolą nie tylko było zapoznanie środowiska inżynierskiego z zakresem przyszłych zmian, ale również dostarczyły materiałów dydaktycznych wykładowcom uczelni wyższych. Obecnie normy te mają status norm wycofanych.

Każdy z Eurokodów powołuje wiele norm związanych, wśród których są normy dotyczące wyrobów będących przedmiotem projektowania [4]. Normy wyrobu z kolei odwołują się do norm na badania właściwości tych wyrobów. Stąd też z Eurokodami związane są dziesiątki norm, czy to odnośnie do wyrobów, czy do badań tych wyrobów. Stosowanie w praktyce części z tych norm jest utrudnione, gdyż wprowadzono je w języku oryginału.

Znaczną część norm odnoszącą się do wyrobów oraz badań ich właściwości, wprowadzono do normalizacji krajowej na długo przed opracowaniem Eurokodów. Doprowadziło to do sytuacji, że wymagane w normach właściwości technicz-

no-użytkowe wyrobów, których zbadanie upoważnia producenta do wystawienia deklaracji zgodności i oznakowania CE wyrobu, nie w pełni odpowiadają potrzebom projektanta konstrukcji. W szczególności mowa tu o wymaganiach dotyczących trwałości konstrukcji.

Ponadto, jak wskazuje autor w [7], istotną sprawą, która wymaga dyskusji jest przyjęty w Eurokodach poziom bezpieczeństwa konstrukcji, wyrażony wartościami współczynników częściowych w odniesieniu do właściwości materiałowych oraz oddziaływań. Przy czym wartości te w wielu przypadkach są kompromisem między wartościami zalecanymi przez Eurokod, a dotychczas przyjmowanymi w PN-B. W konsekwencji poziom bezpieczeństwa wielu konstrukcji jest zwiększony nawet o kilkadziesiąt procent, mimo że dotychczasowy poziom przy projektowaniu wg PN-B był w pełni satysfakcjonujący.

Wymusza to potrzebę ponownej oceny wartości liczbowych częściowych współczynników bezpieczeństwa wraz z zasadami ustalania obciążeń, ale tym razem w odniesieniu do zachowania poziomu bezpieczeństwa, akceptowanego w polskiej praktyce inżynierskiej przez dziesiątki lat [6].

## Nowości w projektowaniu mostów zespolonych

Nowe Europejskie Normy projektowania mostów zespolonych bardzo istotnie różnią się od dotychczas obowiązującej w Polsce praktyki projektowania. Obecnie jedna z nowych, podstawowych zasad zakłada, że przewidywany czas użytkowania mostu stałego wynosi 100 lat, ale z uwzględnieniem obowiązku odpowiedniego utrzymywania i konserwacji obiektu. Oczywiście nie dla wszystkich elementów konstrukcji mostu możliwe jest zapewnienie stuletniej żywotności, np. liny podwieszenia i ich zakotwienia, łożyska itp. W tym przypadku projekt powinien przewidzieć ich wymianę bez większych zakłóceń w normalnym użytkowaniu obiektu. Ponadto elementy konstrukcyjne, do których mocowane jest wyposażenie, powinny być tak projektowane, aby uszkodzenie wyposażenia nie powodowało zniszczenia nośnej konstrukcji mostu, do której jest ono przymocowane.

W trakcie projektowania obiektów należy sprawdzać sytuacje obliczeniowe w kolejności ich występowania, od momentu rozpoczęcia montażu. Efekty oddziaływań (siły wewnętrzne, naprężenia, odkształcenia itp.) określane są przy stosowaniu ogólnej analizy sprężystej lub analizy nieliniowej z uwzględnieniem wpływu deformacji, gdy ich efekty są znaczące (powyżej 10%). Zakładane jest, że efekty oddziaływań można obliczać na podstawie globalnej analizy sprężystej, nawet wtedy, gdy nośność przekroju obliczana jest przy założeniu nieliniowości fizycznych materiałów lub gdy projektant dopuszcza uplastycznienie przekroju. Przy projektowaniu mostów zespolonych najczęściej uzyskiwane były przekroje klasy czwartej. W świetle Eurokodów możemy projektować przekroje wyższych klas, nawet klasy pierwszej, co pozwoli nam w konsekwencji stosować analizę lokalną sprężysto-plastyczną, a nawet lokalną analizę plastyczną. Globalną analizę plastyczną można stosować, jeśli elementy wykazują wystarczającą zdolność obrotową, wymaganą ze względu na redystrybucję momentów zginających oraz pod warunkiem, że można zapewnić stabilność elementów

w miejscach przegubów plastycznych. Analizę sztywno-plastyczną można stosować, jeśli efekty towarzyszące deformacjom (np. efekty drugiego rzędu) są pomijalnie małe.

Jak dotąd projektanci konstrukcji mostowych mieli do czynienia ze stanem granicznym nośności przekroju. Natomiast Eurokod nakazuje sprawdzać aż cztery stany graniczne nośności. Pierwszy stan graniczny związany z nośnością odnosi się do równowagi całej konstrukcji i jest nazywany „EQU” (*Equilibrium*). Oznacza to, że w obliczeniach występuje konieczność uwzględniania stanów montażowych oraz wszystkich rodzajów obciążeń wyjątkowych. Sprawdzenie dotyczy stateczności całej konstrukcji mostu i jej elementów. Najczęściej obliczenia należy przeprowadzać z uwzględnieniem teorii drugiego rzędu, ponieważ w czasie montażu występują duże odkształcenia i przemieszczenia. Musimy tu uwzględnić działania efektów dynamicznych, np. oddziaływania wiatru.

Drugi stan graniczny nośności jest związany z wytrzymałością i nazywa się „STR” (*Strength*). Ten właśnie stan dotąd był sprawdzany według starych, krajowych norm.

Obecnie doszedł jeszcze trzeci stan, nazywany „GEO” (*Geotechnical*). Polega on na sprawdzeniu otoczenia mostu z punktu widzenia geotechniki. Stanu „GEO” nie należy mylić ze sprawdzaniem fundamentów, gdyż te traktuje się jak integralną część konstrukcji mostowej. Wszystkie stany graniczne dotyczą ustroju niosącego, podpór i fundamentów. Natomiast stan „GEO” jest sprawdzeniem, czy nie następuje zniszczenie bądź nadmierne odkształcenie podłoża w otoczeniu mostu.

Projektowanie mostów zespolonych obejmuje również ocenę zmęczenia. Stąd też czwarty stan graniczny nośności „FAT” (*Fatigue*), sprawdzający zmęczenie. Przy sprawdzaniu stanu granicznego zmęczenia stosuje się globalną analizę sprężystą.

Z kolei stany graniczne użyteczności dotyczą funkcji obiektu inżynierskiego, a przede wszystkim komfortu użytkownika, jak również wyglądu zewnętrznego. Stanów granicznych użyteczności jest wiele. W każdej krytycznej sytuacji obliczeniowej należy wyznaczać wartości obliczeniowe efektów oddziaływań  $E_d$ , stosując kombinację oddziaływań, które mogą wystąpić jednocześnie. Ich sprawdzenie polega na porównaniu granicznych wartości odpowiedniego kryterium użyteczności z wartościami obliczonymi efektów oddziaływań, wyznaczonymi dla odpowiedniej kombinacji oddziaływań. W stanach granicznych użyteczności, które są trudniejsze do obliczenia niż stany graniczne nośności, stosuje się również globalną analizę sprężystą, ale z odpowiednimi korektami, dotyczącymi efektów nieliniowych, takich jak np. poślizg w połączeniach, czy zarysowanie betonu. Stany graniczne użyteczności musimy również sprawdzać pod kątem ułatwienia utrzymania mostu i jego napraw. Stąd też projektując obiekt mostowy, trzeba stworzyć dostęp do każdego z elementów konstrukcji, w celu przeprowadzania bieżących inspekcji i odnowy (np. antykorozyjnych powłok ochronnych czy nawierzchni).

W odniesieniu do starych norm krajowych, Eurokody wprowadzają również nowe pojęcie: niezawodność konstrukcji, rozumianą jako zdolność konstrukcji lub jej elementu do spełnienia określonych wymagań, łącznie z uwzględnieniem czasu użytkowania, na który została zaprojektowana. Niezawodność wyraża się zwykle miarami probabilistycznymi

i obejmuje nośność, użyteczność oraz trwałość konstrukcji. Zgodnie z Eurokodami możemy przyjmować różne poziomy niezawodności w odniesieniu do stanu granicznego nośności i stanu granicznego użyteczności. Poziomy niezawodności mogą zależeć od wielu czynników. Między innymi od możliwych konsekwencji awarii, dotyczących zagrożenia zdrowia i życia, potencjalnych strat gospodarczych i uciążliwości społecznych, jak również kosztów zmniejszenia możliwości zaistnienia awarii. Różny też może być stopień niezawodności wymagany przez przepisy krajowe lub lokalne, także przyjmowane przez właścicieli (administratorów) obiektów. W obliczeniach zakładane jest, że trwałość konstrukcji przy odpowiedniej jej konserwacji odpowiada obliczeniowemu okresowi użytkowania.

W konstrukcjach zespolonych rozpatruje się poszczególne stadia zgodnie z kolejnością ich występowania. W tym celu należy przeprowadzić analizy, które obejmują efekty poszczególnych stadiów wykonania. Jeżeli zajdzie taka potrzeba, to należy również uwzględnić efekty oddziaływań w stosunku do stali konstrukcyjnej i całkowicie lub częściowo – elementów zespolonych. Efekty kolejności wykonania mogą być pominięte w analizie stanów granicznych innych niż zmęczenie w przypadku elementów zespolonych z przekrojami poprzecznymi klasy 1 lub 2, w których naddatki z uwagi na wyoboczenie boczne ze skrzyśnieniem nie są konieczne.

W projektowaniu konstrukcji zespolonych, składających się z części składowych: stalowych i betonowych, należy uwzględnić zjawiska reologii betonu. Efekty skurczu i pelzania betonu oraz nierównomiernych zmian temperatury, powodują powstanie si wewnętrznych w przekrojach konstrukcji, krzywizn i odkształceń podluznych w elementach. Efekty, które występują w statycznie niewyznaczalnych i statycznie wyznaczalnych konstrukcjach, klasyfikuje się jako efekty pierwotne, jeżeli nie uwzględnia się zgodności odkształceń. W konstrukcjach statycznie niewyznaczalnych podstawowe efekty zarówno skurczu, jak pelzania i temperatury są uozsamiane z dodatkowymi efektami oddziaływań. Klasyfikuje się je wówczas jako efekty uboczne, a także traktuje się jako oddziaływanie wymuszone.

Dotychczas projektanci pomijali zagadnienie wplywu zarysowania betonu na sztywnoc przekroju zespolonego (a tym samym na jego nonoc), zakładając, że rozciąganie będzie przenoszone przez konstrukcj stalową oraz zbrojenie płyty. Metoda ta nie do końca była zgodna z rzeczywistą prac konstrukcji. Eurokod 4 umożliwia taką analizę. Uwzględnienie sztywności betonu na odcinkach między rysami jest nowoczesnym, bliskim rzeczywistości sposobem oceny nośności i użytkowności konstrukcji, który daje wymierne efekty ekonomiczne. Zagadnieniem ujcia sztywności zarysowanego betonu w switle Eurokodu 4 autor zaj się w pracy [8] a także autorzy w [3].

W Eurokodzie 4 bardzo duże znaczenie jest przypisywane uwzględnianiu róznych efekt przy sprawdzaniu stan granicznych użytkowności. Stąd też w obliczeniach naprężeń w belkach należy uwzględnić następujące efekty:

- szerokich pasów,
- pelzania i skurczu betonu,
- zarysowania betonu i wplywu betonu na odcinkach między rysami,
- kolejności wykonania,

- zwiększonej giętkości, wynikającej ze znacząco niepełnej interakcji na skutek poślizgu w połączeniach na ścinanie (skutek podatności zespolenia),
- niesprężystego zachowania się stali i zbrojenia,
- wichrowania na skutek skrzyśnania i zniekształcania.

## Podsumowanie

Eurokod 4 jest pierwszą w Polsce norm do projektowania zespolonych obiekt mostowych. Z tego powodu w całości jest ona nowością zarówno w procesie projektowania, jak i budowy most zespolonych.

Projektowanie według Eurokod zdecydowanie rozni się od procesu projektowania opartego na starych normach. To, co jest znamienne dla Eurokod, w odróżnieniu od dotychczasowych norm krajowych, to występowanie zasad i reguł. Przy czym zasady są ustaleniemi ogonymi, zawierającymi wymagania i modele, dla których nie ma alternatywy (oznacza się je liter P po numerze akapitu), natomiast reguł stosowania są zgodne z zasadami i spełniają ich wymagania. Dopuszczane są jednak reguł alternatywne. W tekście PN-EN jest zdecydowanie więcej reguł ni zasad, więc projektant nie jest ściśle związany ze wszystkimi zapisami norm i tym samym ma większą swobod. Eurokody stanowi zatem bardzo logiczny i kompleksowy system normalizacyjny.

## Bibliografia

- [1] K. Furtak, *Mosty zespolone*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa Kraków 1999
- [2] G. Łagoda, M. Łagoda (2010), *Projektowanie most zespolonych w switle PN-EN 1994-2*, Materiały Budowlane, Nr 4, 2010
- [3] G. Łagoda, W. Radoski, M. Łagoda, *Effect of Tension Stiffening in Composite Bridges in the Light of Eurocodes*, IABMAS Philadelphia 2010 Edited by: Dan M. Frangopol Lehigh University, Bethlehem, Pa, USA. Taylor & Francis Group, London, UK 2010
- [4] M. Łagoda, *Teraz Eurokody*, Inżynier Budownictwa, Nr 4 (72), 2010
- [5] M. Kaproń, R. Gajownik, S. Wall, *Przyszo Eurokod w Polsce – nowe kierunki rozwoju*, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Nr 276, Budownictwo i Inżynieria Środowiska z 58 (3/11/I), 2011
- [6] S. Karaś, T. Dul: *O porównaniu efekt obcie most drogowych wg PN-85/S-10030 i PN-EN-1991-2*, Drogownictwo, nr 12/2011
- [7] J. Pawlikowski, *Zasady ustalania obcie oraz obcieenia stae i użytkowe według Eurokod. XXVI Ogonopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji*, Szczyrk 2011
- [8] K. Śledziwski (2012): *Sztywno zarysowanego betonu w ciągłych belkach zespolonych typu stal beton według PN-EN 1994-2*. Drogownictwo, nr 1/2012
- [9] PN-82/S-10052 Obiekty mostowe. Konstrukcje stalowe. Projektowanie
- [10] PN-91/S-10042 Obiekty mostowe. Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Projektowanie
- [11] PN-EN 1994-2:2010 Projektowanie konstrukcji zespolonych stalobetonowych. Część 2: Reguły ogólne i reguły dla most ■

*Uczestnik projektu „Kwalifikacje dla rynku pracy – Politechnika Lubelska przyjazna dla pracodawcy” wspfinansowanego przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.*

*Participant of the project: „Qualifications for the labour market – employer friendly university”, cofinanced by European Union from European Social Fund.*