MARCIN SKWAREK, *marcin.skwarek@pracowniaprojektowa.com.pl*
DOMINIKA TOMSKA, *dominika.tomska@ pracowniaprojektowa.com.pl*
Pracownia Projektowa M.Skwarek J.Hulimka Sp. J.
JACEK HULIMKA, *jacek.hulimka@polsl.pl*
MARCIN KOZŁOWSKI, *marcin.kozlowski@polsl.pl*
Politechnika Śląska w Gliwicach, Katedra Inżynierii Budowlanej

PROBLEMY WZMACNIANIA STALOWYCH, KRATOWYCH WIEŻ TELEKOMUNIKACYJNYCH

SOME PROBLEMS WITH STEEL LATTICED TELECOMMUNICATION TOWERS STRUCTURE STRENGTHENING

Streszczenie Nieustanny rozwój technologiczny komunikacji bezprzewodowej oraz radiodyfuzji wiąże się nieuchronnie z koniecznością modyfikacji bądź rozbudowy antenowych systemów nadawczych i nadawczo-odbiorczych. Dla antenowej konstrukcji wsporczej jest to za każdym razem zmiana warunków pracy, poprzez zmiany konstrukcji i układów obciążeń, a w efekcie korektę charakterystyk dynamicznych. W wielu przypadkach analizy obliczeniowe wykazują wówczas niedostateczną nośność, a co za tym idzie potrzebę wzmacniania konstrukcji. W niniejszym referacie przedstawione zostaną najczęstsze błędy popełniane przy projektowaniu i realizacji wzmocnień stalowych wież kratowych. W tym aspekcie autorzy podkreślają, że sztuka oceny nośności i stanu technicznego istniejących konstrukcji różni się zasadniczo od inżynierskiej praktyki projektowej.

Abstract Permanent evolution in telecommunication and broadcasting makes the antenna systems modification or extension requirement frequently. By this case, the antenna support structure everly need structural or loads changes and consequently the adjustment of dynamic characteristics. Results of structure analysis of such situations reveal to low load capacity and strengthening requirement. This paper presents the most failures in design and execution of steel latticed towers strengthening. In terms of subject study, authors try to show that the estimation of load capacity and condition of existing structures is fundamentally different from engineering design practice.

1. Geneza problemu

Minione dwie dekady, w dziedzinie telekomunikacji bezprzewodowej, a także radiodyfuzji, upłynęły w Polsce pod znakiem dynamicznego rozwoju, trwającego (może nieco mniej intensywnie) nadal. Powstające nowe sieci telefonii komórkowej, wprowadzane kolejne generacje standardów połączeń i transmisji danych, czy wreszcie modernizacje w radiodyfuzji i wdrożenie systemów cyfrowych (tzw. „cyfryzacja”) zyskują każdorazowo wymiar zagadnienia inżynierskiego z zakresu oceny nośności konstrukcji budowlanych. Wprowadzanie nowych, bądź modernizacja istniejących systemów nadawczo – odbiorczych lub nadawczych, a także linii radiowych, wiąże się bowiem z odpowiednimi zmianami układów obciążeń antenowych konstrukcji wsporczych (wymiana lub montaż nowych anten, urządzeń i kabli). Zmianom technologicznym towarzyszy nierzadko przebudowa lub rozbudowa elementów konstrukcyjnych, głównie pośrednich, służących do montażu instalacji antenowych lub pomostów umożliwiających dostęp do nich. Wszystkie tego typu zabiegi wpływają w określony sposób na warunki

pracy konstrukcji wsporczej (wieży lub masztu), co odzwierciedlać muszą wyniki analizy statyczno-wytrzymałościowej. W pewnych przypadkach wykazują one niedobory nośności elementów konstrukcji, warunkując zrealizowanie zamierzenia inwestycyjnego wykonaniem odpowiednich wzmocnień.

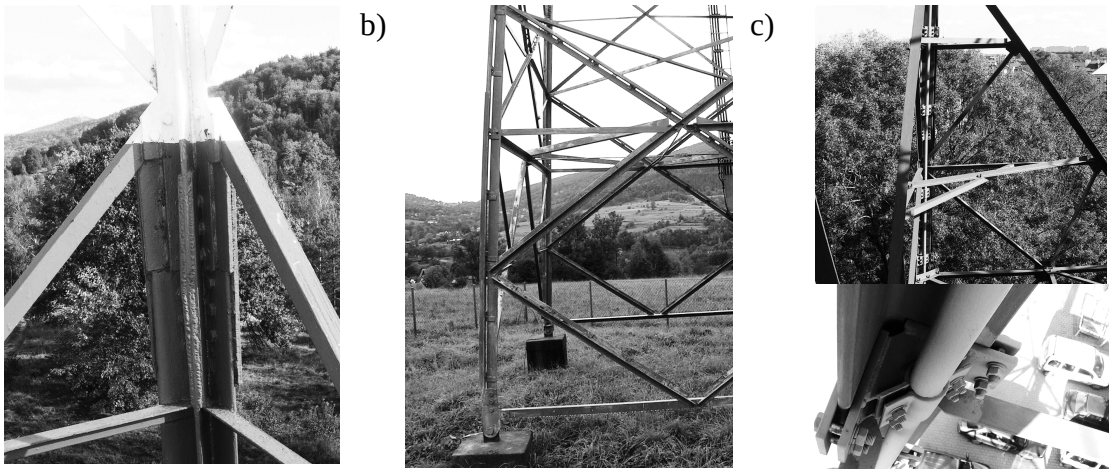
W niniejszym referacie przedstawiono i opisano wybrane i najczęstsze błędy związane ze wzmacnianiem konstrukcji stalowych kratowych wież telekomunikacyjnych, wyodrębniając dwa zagadnienia związane z utratą stateczności krawężników i skratowań przy ściskaniu. Trzecie z poruszonych zagadnień, zdaniem autorów najistotniejsze, obejmuje różne aspekty związane z oceną nośności istniejących obiektów, a wpływające bezpośrednio na uzyskiwane wyniki obliczeń i ich interpretację.

2. Utrata nośności (stateczności) krawężników (pasów kratownicy przestrzennej)

Utrata nośności wyboczeniowej prętów krawężników oraz konieczność ich wzmocnienia, to z reguły pierwszy z problemów pojawiających się w przypadku negatywnych wyników analizy obliczeniowej istniejącej konstrukcji wieży. Mnogość stosowanych tu rozwiązań, mniej lub bardziej poprawnych technicznie, umożliwiłaby z powodzeniem rozwinięcie tego tematu w odrębną pracę. Z uwagi na szczupłość miejsca, autorzy skupili się na najczęściej spotykanym problemie wzmocnienia krawężników wykonanych z kątowników równoramiennych.

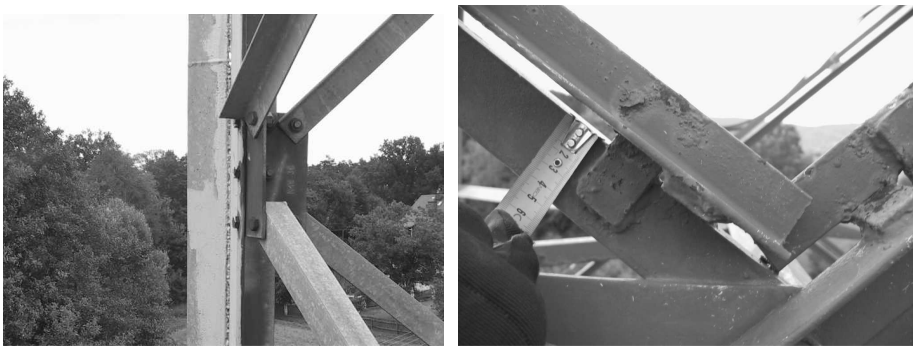
Powszechnie spotykanym rozwiązaniem wzmocnienia pasów trzonu kratowego wieży wykonanych z kątowników równoramiennych jest tzw. rozbudowa przekroju. Realizowana jest ona w różny sposób, bądź poprzez ciągłe przyspawanie dodatkowego przekroju (rys. 1a), bądź poprzez stworzenie „przekroju dwugałęziowego” (rys. 1b, 1c).

a) b) c)



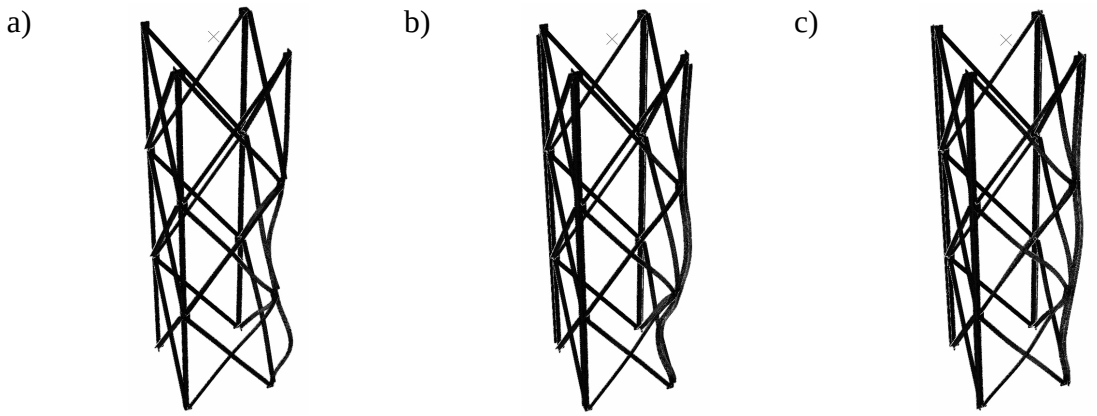
Rys. 1. Przykłady realizowanych wzmocnień krawężników wież (opis w tekście)

W pierwszym przypadku, tj. ciągłego dospawania dodatkowego profilu zasygnalizować należy dwa istotne, często spotykane błędy. Pierwszym, stwierdzonym podczas oględzin różnych realizacji, jest z reguły niska jakość spoin, gdzie już podstawowa ocena makroskopowa uniemożliwia traktowanie ich jako połączeń konstrukcyjnych (rys. 2). Drugi problem dotyczy zakresu projektowego, a objawia się powszechnym pomijaniem lub co najmniej bagatelizowaniem faktu obniżenia trwałości konstrukcji poprzez wprowadzenie wielu karbów zmęczeniowych (co dotyczy także dalej omawianych rozwiązań). Problem nośności zmęczeniowej wież (także masztów) nie był jednak do tej pory szerzej omawiany w literaturze, dlatego autorzy mają zamiar poruszyć go w odrębnych publikacjach.



Rys. 2. Przykłady wadliwych spoin przy montażu elementów wzmocnień krawężników wież

Zdecydowanie więcej nieprawidłowości, głównie po stronie projektowej, pojawia się przy rozbudowie przekroju krawężnika do dwugałęziowego. W przypadku rozpatrywanych obiektów jest to często zabieg dość osobliwy, z uwagi na stosowanie drugiej gałęzi o różnym (z reguły mniejszym) przekroju. Kolejnym problemem jest w tych przypadkach kwestia właściwego rozmiaru, rozmieszczenia i konstrukcji przewiązek. Niestety, w większości przypadków są one zbyt małe oraz rozmieszczane dość chaotycznie, a przede wszystkim z pominięciem węzłów trzonu kratowego (rys. 1b). Chcąc zobrazować sam wpływ rozmieszczenia przewiązek, autorzy wykonali prostą analizę wyboczeniową modelu niewielkiej kratownicy przestrzennej, o podstawie kwadratu. Jej krawężniki, wykonane nominalnie z kątownika równoramiennego L60×60×6 (rys. 3a), „wzmocniono” kątownikiem równoramiennym o przekroju L45×45×5, przyjmując kolejno: rozrzedzony rozstaw przewiązek, tj. z pominięciem węzłów trzonu (rys. 3b) oraz właściwy, zakładając w węzłach przewiązki w obydwu kierunkach, oraz naprzemienne pomiędzy węzłami (rys. 3c), przy zachowaniu ich rozstawu nie większego niż 60 i_{min}. Każdy z modeli obciążano siłą poziomą przyłożoną w kierunku przekątnej podstawy trzonu, na jego wierzchołku, w środku ciężkości, poprzez wprowadzoną tu teoretyczną tarczę sztywną (przeponę).

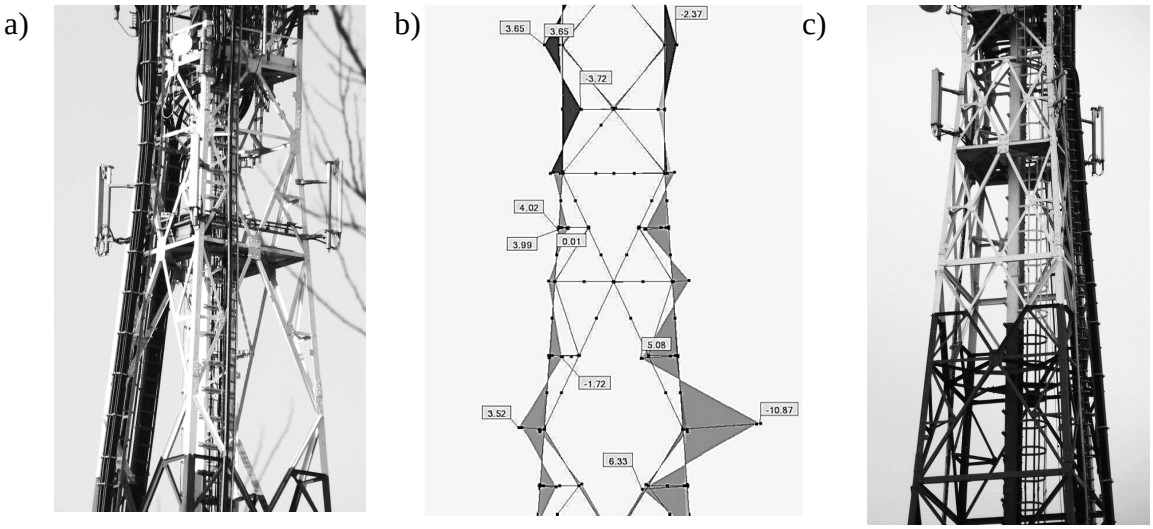


Rys. 3. Wyniki porównawczej analizy wyboczeniowej (opis w tekście)

Przyjmując, że w przypadku modelu bazowego (rys. 3a) obciążenie krytyczne trzonu wynosi 100%, to w kolejnych przypadkach sięga odpowiednio wartości 213% (rys. 3b) oraz 257% (rys. 3c). Widoczne jest więc, że nieprawidłowe rozmieszczenie przewiązek w sposób istotny obniża zakładaną nośność przekroju dwugałęziowego. Niejako odrębnym tematem jest sposób wykonstruowania wzmocnienia jak na rysunku 1c, z zastosowaniem połączeń ciernych, skręcanych na śruby zwykłe. Zasadność uwzględnienia w obliczeniach współpracy tego typu elementów autorzy pozostawiają do oceny czytelnika. Należy tu jednak zaznaczyć,

że w wielu przypadkach obliczenia dołączane do projektów takich wzmocnień, prowadzone z reguły z zastosowaniem programów komputerowych, pokazują, że stosuje się tu indywidualnie zdefiniowany przekrój lity, złożony z dwóch profili, pomijając w ten sposób sprawdzenie możliwości wyboczenia pojedynczej gałęzi.

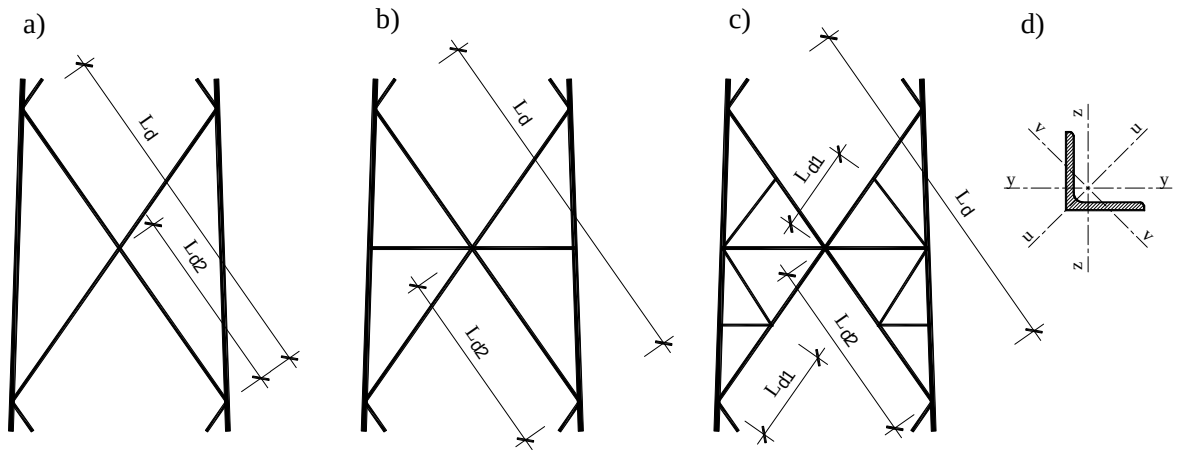
Rozważając temat wzmocnień krawężników wież autorzy chcą jeszcze podkreślić jedną istotną kwestię. Otóż w większości przypadków wyniki obliczeń komputerowych traktowane są przez ich autorów w sposób bezkrytyczny (zielony lub czerwony kolor ikonki…), a utarte sposoby postępowania (np. opisane wyżej) przyjmowane nieomal jak dogmat. Tymczasem, gdy nieco głębiej przeanalizuje się np. formuły weryfikacyjne czy też wielkości sił wewnętrznych w prętach krawężników przestrzennego modelu wieży kratowej, często dojść można do wniosku, że nadmierne wykorzystanie nośności ciągłych pasów, przy znacznym obciążeniu poziomym, wynika z powstających momentów drugorzędnych o znaczących wartościach. W takich wypadkach efektywniejszym sposobem wzmocnienia jest korekta układu skratowań, w tym wprowadzenie odpowiednich przepon. Zrealizowane w ten sposób wzmocnienie wieży prezentuje poniższy rysunek, gdzie pokazano fragment trzonu przed wzmocnieniem (rys. 4a), wykres drugorzędnych momentów zginających w tym samym fragmencie konstrukcji przed wzmocnieniem (rys. 4b) oraz widok wzmocnionej konstrukcji (rys. 4c).



Rys. 4. Przykład wzmocnienia krawężników poprzez korektę układu skratowań (opis w tekście)

3. Wyboczenie prętów skratowania

Temat wzmacniania prętów skratowań zagrożonych utratą stateczności ogólnej przy ściskaniu ograniczony został w niniejszym referacie do zagadnienia wyboczenia z płaszczyzny skratowania krzyżulców, przy krzyżowych („X”) układach skratowań (rys. 5). Autorzy zauważają tu, że podstawowym problemem nie jest w tym wypadku niewłaściwe projektowanie wzmocnień, lecz brzemienny w skutkach błąd zaniechania na wcześniejszym etapie analizy nośności konstrukcji, szczególnie, gdy krzyżulce wykonane są z kątowników. Projektanci często zdają się zapominać, że w przypadku połączenia ciągłych prętów w miejscu ich przecięcia, ten ściskany jest przynajmniej częściowo przytrzymywany przez drugi – rozciągany. Stosowne procedury w tym zakresie, polegające na odpowiednim ustaleniu długości wyboczeniowej, podają normy. Formuły takie, dedykowane do obliczania trzonów wież i masztów, zamieszczone zostały w załączniku G normy [3], co opisano skrótowo poniżej.



Rys. 5. Typowe układy skratowań krzyżowych „X” i oznaczenie osi bezwładności kątownika

W przypadku skratowania typu „X” bez prętów drugorzędnych (jak na rys. 5a), jeżeli siła poprzeczna w trzonie rozkłada się równo na siły rozciągającą i ściskającą w krzyżulcach, przyjmuje się, że punkt przecięcia prętów jest podparty w kierunku prostopadłym do płaszczyzny skratowania, wyznaczając smukłość pręta ściskanego ze wzoru:

$$\lambda = \frac{L_{d2}}{i_{vv}} \tag{1}$$

Jeżeli natomiast siły ściskająca i rozciągająca w krzyżulcach są różne, dodatkowo sprawdza się, czy suma nośności wyboczeniowych obydwu prętów jest nie mniejsza od algebraicznej sumy obydwu sił osiowych. Przy obliczaniu nośności wyboczeniowych smukłość prętów wyznacza się wówczas ze wzoru:

$$\lambda = \frac{L_d}{i_{yy}} \text{ lub } \lambda = \frac{L_d}{i_{zz}} \tag{2}$$

odpowiednio do ułożenia kątownika, jeśli ma on przekrój nierównoramienny. Te same reguły dotyczą układu skratowań z ciągłymi krzyżulcami i drugorzędnymi słupkami jak na rys. 5b. Jeśli natomiast krzyżulce są dzielone, a ciągły jest słupek, pojedyncze ramiona prętów ukośnych sprawdza się na wyboczenie, wyznaczając smukłość wg wzoru (1), przyjmując, że środkowy punkt układu skratowania jest podparty w kierunku prostopadłym do jego płaszczyzny, jeżeli słupek zdolny jest przenieść siłę ściskającą, równą składowej poziomej algebraicznej sumy sił osiowych w krzyżulcach. Natomiast w przypadku, kiedy wprowadzone są pręty drugorzędne jak na rys. 5c, nośność wyboczeniową ramienia krzyżulca ściskanego wyznacza się kolejno dla smukłości:

$$\lambda = \frac{L_{d1}}{i_{vv}} \tag{3}$$

a następnie:

$$\lambda = \frac{L_{d2}}{i_{yy}} \text{ lub } \lambda = \frac{L_{d2}}{i_{zz}} \tag{4}$$

W przypadku gdy krzyżulce są ciągłe na całej długości L_d sprawdza się dodatkowo warunek algebraicznej sumy sił osiowych opisany wyżej, wyznaczając smukłość ze wzoru (2).

Powyższe pokazuje, że analiza nośności skratowań trzonu wieży może być żmudna, wziąwszy pod uwagę brak implementacji opisanych procedur normy [3] w powszechnie stosowanych programach komputerowych. Nie usprawiedliwia to jednak zaniechania stosownych obliczeń. W tym świetle autorzy pozostawiają bez komentarza często stosowany sposób wzmocnienia krzyżulców z uwagi na rzekomą utratę stateczności przy wyboczeniu z płaszczyzny skratowania jak na rys. 6 (wzmocnienia pojedynczych ramion).

Rys. 6. Przykłady zrealizowanych „wzmocnień” krzyżulców (opis w tekście)

4. Inne aspekty związane z oceną nośności istniejących konstrukcji wież

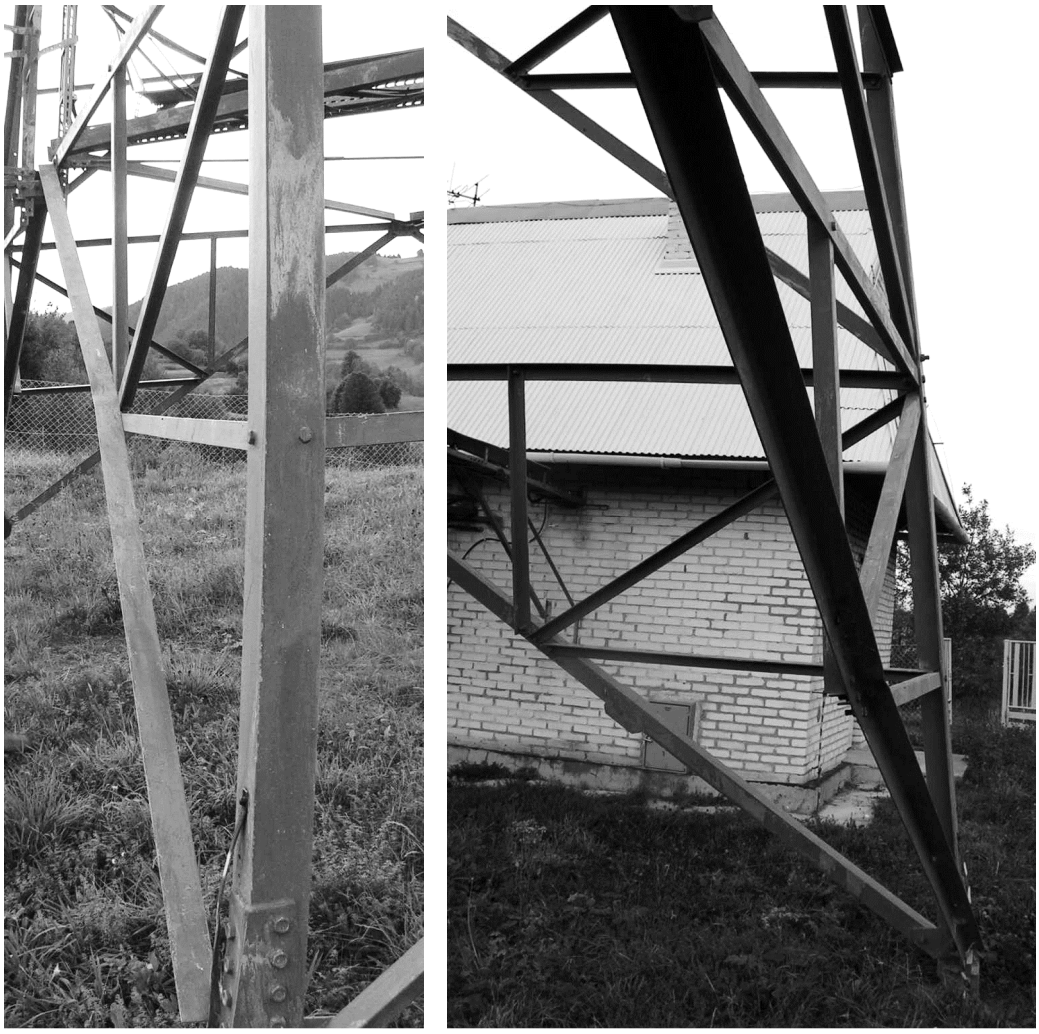
Wywołane wcześniej problemy, związane z oceną trwałości konstrukcji oraz zaniechaniami na etapie wstępnej analizy obliczeniowej, otwierają szeroki zbiór zagadnień wiążących się ze sprawdzaniem nośności istniejących antenowych konstrukcji wsporczych, w tym stalowych wież kratowych. Są one niezmiernie istotne i ściśle związane z tematem niniejszej pracy, gdyż rzutują bezpośrednio na zasadność lub sposób projektowania ewentualnych wzmocnień. Biorąc jednak pod uwagę ograniczoną objętość referatu, możliwe jest jedynie zasygnalizowanie najważniejszych kwestii, z których każdą rozwinąć można w odrębną pracę. Oto one:

– oględziny i ocena stanu technicznego konstrukcji – niewłaściwe ustalenie przyczyn odkształceń prętów ustrojów kratowych, u źródła których w wielu przypadkach leżą uszkodzenia mechaniczne, prowadzi do mylnego przeświadczenia o konieczności wykonania wzmocnień (przykład na rys. 7); w innych przypadkach, brak uszkodzeń elementów trzonu kratowego, to ważny element, który musi zostać uwzględniony przy interpretacji wyników obliczeń konstrukcji,
– zamienne procedury norm [2] i [3] w zakresie wyznaczania obciążenia wiatrem wież – zasygnalizowane w pracy [6], prowadzą w wielu przypadkach do istotnie rozbieżnych wyników obliczeń, dając pewien przedział uzyskiwanych wartości; dodatkowe „zamieszanie” wprowadza tu, ciągle jeszcze nagminne, stosowanie zastąpionych Eurokodami norm PN, co wcześniej autorzy podkreślali w pracy [5],
– ustalenie łącznych wartości sił oporu aerodynamicznego, z uwzględnieniem wpływu interferencji aerodynamicznej (elementy wyposażenia – trzon kratowy wieży) – zachowawcze warunki normy [3] prowadzą w wielu przypadkach do sumowania sił oporu aerodynamicznego bez uwzględniania tzw. współczynnika przesłaniania, podczas gdy np. w pracy [7] wykazano, iż te, ustalone w drodze badań tunelowych, osiągają istotnie mniejsze wartości; świadomość tego problemu jest ważnym elementem interpretacji wyników obliczeń,
– zmiana charakterystyk dynamicznych konstrukcji – korekta układu obciążeń, a więc i mas, a często dodanie (nadbudowanie) elementów konstrukcji wsporczych anten, ale także wprowadzenie ewentualnych wzmocnień wieży, prowadzą do oczywistych

zmian częstotliwości drgań własnych, co może prowadzić do zmiany wielkości odpowiedzi dynamicznej, a więc korekty wszystkich obciążeń obliczeniowych wynikających z oddziaływania wiatru; często spotykane są analizy pt.: „sprawdzenie pod dodatkowym obciążeniem…” traktowane dosłownie, poprzez przyłożenie dodatkowych sił do analizowanego ustroju, gdzie tymczasem, w świetle powyższego, działanie takie może być traktowane tylko jako sprawdzenie uproszczone,

– metody doświadczalne – normy Eurokod dopuszczają ich stosowanie, co prócz wspomnianych wyżej współczynników oporu aerodynamicznego, dotyczy także charakterystyk dynamicznych konstrukcji, a także charakterystycznych prędkości wiatru; po te ostatnie, szczególnie w sytuacjach awarii, warto sięgnąć np. do zasobów Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej, korzystając z danych pochodzących z najbliższej stacji meteorologicznej, co podkreślone zostało w pracy [8]; dane takie wielokrotnie były pozyskiwane przez autorów i wykorzystane zostały m.in. w pracy [6],

– zarządzanie niezawodnością konstrukcji – sprowadza się tu do przyjmowanych wartości częściowych współczynników bezpieczeństwa dla obciążeń, zgodnie z normą [3], w uzależnieniu od klasy niezawodności konstrukcji, co jest zasadą w rozumieniu [1]; zatem błędem jest przyjmowanie ogólnych wartości tychże współczynników wg [1] (problem szerzej opisano w artykule [4]).



Rys. 7. Przykład mechanicznego uszkodzenia pręta skratowania zakwalifikowanego błędnie jako utrata jego stateczności

Zasygnalizowane wyżej zagadnienia powinny zostać wzięte pod uwagę w zakresie oceny nośności istniejących konstrukcji, szczególnie, gdy na podstawie wniosków z takich analiz zaleca się realizację wzmocnień.

5. Podsumowanie

W referacie przedstawione zostały i omówione najczęstsze błędy popełniane przy projektowaniu i realizacji wzmocnień konstrukcji telekomunikacyjnych stalowych wież kratowych. Ze względu na ograniczoną objętość wiele problemów z tego zakresu zostało jednak pominiętych. Wśród omówionych zagadnień, jako najistotniejsze autorzy wskazują problemy związane z oceną nośności istniejących konstrukcji, będące podstawowym źródłem wielu błędów, a często także niepotrzebnych wzmocnień. Referat staje się zatem kolejnym głosem sygnalizującym problemy rzeczoznawstwa budowlanego. Dowodzi, że mimo, iż ustawa Prawo Budowlane i związane z nią rozporządzenia dopuszczają wykonywanie ekspertyz przez osoby posiadające jedynie uprawnienia do projektowania bez ograniczeń, to sztuka ta wymaga jednak znacznie szerszego przygotowania merytorycznego, a także doświadczenia.

Literatura

4. PN-EN 1990:2004 Eurokod. Podstawy projektowania konstrukcji, PKN, Warszawa 2004.
5. PN-EN 1991-1-4:2008 Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania wiatru, PKN, Warszawa 2008.
6. PN-EN 1993-3-1:2008 Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 3-1: Wieże, maszty i kominy. Wieże i maszty, PKN, Warszawa 2008.
7. Skwarek M., Hulimka J.: Obciążenia w obliczeniach stalowych wież kratowych na podstawie norm Eurokod. Szersze spojrzenie, Inżynier Budownictwa, nr 3/2012, s. 76-80.
8. Skwarek M., Hulimka J.: Stalowa, kratowa wieża telekomunikacyjna zagrożona awarią? O ocenie nośności wież w diagnostyce konstrukcji, Materiały XXV Konferencji Naukowo-Technicznej Awarie Budowlane, Szczecin-Międzyzdroje 24-27 maja 2011, tom 2, s. 891-898.
9. Skwarek M., Hulimka J.: Wybrane problemy wyznaczania obciążenia wiatrem wież kratowych w ujęciu norm PN-EN, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Budownictwo i Inżynieria Środowiska, z. 58 (3/11/II), s. 299-306, Rzeszów 2011.
10. Wood G.S.: Wind Loading of Telecommunication Antennas and Head Frames, Research Report No R881, The University of Sydney, School of Civil Engineering, Sydney 2007.
11. Żurański J.A.: W sprawie obciążenia wiatrem wieży kratowej, Inżynieria i Budownictwo, Nr 10/2004, s. 568.