

dr hab. Eur. inż. Tomasz Błaszczyński, prof. nadzw.*
dr hab. inż. Maciej Szumigala, prof. nadzw.*
mgr inż. Łukasz Polus*

Analiza uszkodzeń dwóch stalowych wież antenowych oraz propozycja ich naprawy

Analysis of damage of two steel antenna towers with repair proposal

Streszczenie. Przedstawiono analizę uszkodzeń dwóch prawie nowych stalowych wież antenowych o różnej wysokości. Zimą zauważono najpierw w niższej wieży, a po pilnym zarządzeniu przeglądu również w wyższej wieży, znaczne podłużne pęknięcia krawężników wykonanych z rur okrągłych. Przeprowadzona analiza wskazała brak szczelności połączeń spawanych oraz niewłaściwy dobór stali konstrukcyjnej przez wykonawcę. Przedstawiono również propozycje niezbędnych wzmocnień.
Słowa kluczowe: konstrukcje stalowe, uszkodzenia, wzmocnienie.

Abstract. In the paper analysis of damage of two of different high almost new antenna towers is presented. During winter circular pipes crack longitudinally. The ice was found in the damaged members. Designers and investor were surprised by the amount of water in the pipes, in spite of designing of the almost tight lock of internal spaces by welding. Introduced analysis univocally evidenced the lack of connection tightness and the improper selection of construction steel by the contractor. In the paper necessary strengthening were suggested.

Keywords: steel structures, structural damage, strengthening.

W wieże antenowe i inne obiekty wieżowe obecnie często projektuje się i wykonuje z rur. W trzonach o przekroju kwadratowym czy trójkątnym łatwo skonstruować połączenia tych rur z zakratowaniem oraz połączenia montażowe samego trzonu. Rury przewyższają również inne kształtowniki zaletami w zakresie zabezpieczenia antykorozyjnego. Mają one bowiem najmniejszą powierzchnię do malowania i łatwy dostęp z każdej strony [1, 2]. Wydawać się może, że wieża o krawężnikach z rur stalowych nie sprawi kłopotów użytkownikowi. Okazało się jednak inaczej.

Stan techniczny wież i opis uszkodzeń

Dwie wieże wykonano w formie przestrzennej wspornikowej kratownicy o przekroju kwadratowym. W przypadku wyższej wieży (wysokości 30 m) wymiary osiowe przekroju u podstawy to 3,0 x 3,0 m, a od 10,0 m w górę przekrój był stały i miał wymiary 2,0 x 2,0 m. Krawężniki od poziomu 0,0 – 10,0 m zaprojektowano z rur średnicy $D = 219,1$ mm i grubości ścianki $g = 10$ mm, od 10,0 – 20,0 m z rury o $D = 193,7$ mm i $g = 10$ mm, a od 20,0 – 30,0 m z rury o $D = 168,3$ mm i $g = 10$ mm. Wymiary przekroju wieży niższej (wysokości 20 m) wynosiły 2,0 x 2,0 m i były stałe na całej wy-

sokości. Krawężniki od poziomu 0,0 – 2,5 m zaprojektowano z rur średnicy $D = 244,5$ mm i grubości ścianki $g = 16$ mm, a od 2,5 – 20,0 m z rury o $D = 193,7$ mm i $g = 11$ mm. W obu wieżach krawężniki połączone zakratowaniem. Krzyżulce wykonano z dwuteowników szerokostopowych HEB 160, a poziome słupki z ceownika U120. Projektant przyjął do obliczeń stal St3S w przypadku kształtowników oraz R35 rur. Natomiast w dokumentacji powykonawczej znaleziono śladowe informacje na temat stali S235JR. Zakratowanie zostało bezpośrednio przyspawane do krawężników z rur, tworząc bardzo sztywne przestrzenne węzły.

Zgodnie z relacjami użytkowników wież, w grudniu 2012 r. najpierw stwierdzono uszkodzenia wieży niższej (20,0 m), a po zarządzeniu przeglądu, podobne uszkodzenia w drugiej wieży (30,0 m). Były to pęknięcia (rozerwania) rur krawężników w różnych miejscach (fotografia 1). W większości przypadków pęknięcia wykazywały kierunek zbliżony do pionowego, lecz wielkość i zakres były bardzo różne (aż do 800 mm długości). Wewnątrz uszkodzonych rur znajdował się lód. Skontrolowano więc inne krawężniki, pod kątem możliwości wypięnienia wodą. W przypadku wyższej wieży zalegała woda w jednym z krawężnikach, a w przypadku niższej wieży w siedmiu. W związku z tym u dołu



Fot. 1. Pęknięte rury w wieży wysokości: a) 30,0 m; b) 20,0 m

wykonano otwory, przez które po ustąpieniu mrozów wypłynęła znaczna ilość wody.

Jak wynikało z przeglądu przeprowadzonego podczas wizji lokalnych, stan techniczny pozostałych fragmentów wież był stosunkowo dobry. Trudno jednoznacznie określić jakość spoin pokrytych grubą powłoką malarską. Spoiny były dość grube (>10 mm), lecz równe, nie stwierdzono również kraterów i pęknięć. Jednak podczas pobierania próbek z uszkodzonych krawężników wyższej wieży, w celu zbadania jakości stali, zaobserwowano odpadnięcie farby z części skorodowanej spoiny i wypływającą wodę z okolic styku kołnierzego nad dolnym segmentem. Zauważono nieszczelność (otwór-krater) w spoinie między rurą górnego krawężnika a blachą kołnierkową, co pokazano na fotografii 2.

Analiza obliczeniowa wycięcia konstrukcji

Dokumentacja budowlana analizowanych obiektów nie zawierała obliczeń statyczno-wytrzymałościowych. Wykonano

* Politechnika Poznańska, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska



Fot. 2. Nieszczelność (otwór-krater) w spoinie między rurą górnego krawężnika a blachą kołnierkową; widoczne ognisko silnej korozji (pod farbą) i znaczne pęknięcia farby

więc własne obliczenia (zgodnie z normami [3 – 5]), które wykazały niski poziom wykorzystania nośności elementów wież, co w zaistniałej sytuacji okazało się bardzo korzystne (rysunek 1). Należało stwierdzić, czy osłabione uszkodzeniami elementy nie zagrażają bezpieczeństwu wież oraz czy istnieje możliwość chwilowego usunięcia uszkodzonego elementu, podczas jego wymiany na nowy. Przeprowadzono dodatkowe obliczenia, uwzględniając usunięcie niektórych uszkodzonych elementów, szczególnie w dolnych segmentach. Wynik dla wyższej wieży był korzystny, co oznaczało,



Rys. 1. Schematy obliczeniowe wieży wysokości: a) 30,0 m; b) wysokości 20,0 m



Rys. 2. Uwzględnienie w obliczeniach usunięcia dolnego krawężnika

że dla niższej można uznać go również za korzystny.

Dzięki dużej sztywności i nośności zakratowania okazało się, że chwilowo można usunąć jeden dolny krawężnik na czas jego wymiany. Uwzględnione w obliczeniach usunięcie dolnego krawężnika przedstawiono na rysunku 2.

Analiza przyczyn uszkodzeń

Zazwyczaj przyczyną awarii lub katastrofy jest nałożenie się kilku czynników. W analizowanym przypadku bezpośrednią przyczyną rozsądzenia rur krawężników była niewątpliwie zamarzająca w nich woda, ale niezmiernie ważną jest odpowiedź na pytanie, jak się tam ona dostała. Analizując wykonane spoiny, należy stwierdzić, że ich grubość znacznie przekraczała dopuszczalne wymiary. Tak grube spoiny (> 10 mm) i to prawdopodobnie nakładane wielowarstwowo, powodowały nie tylko przegrzanie łączonych elementów, ale również ich mikrospeknięcia. Dodatkowym czynnikiem mogła być skłonność do kruchego pęknięcia zastosowanej stali. Zjawisku temu sprzyjała dość niska temperatura otoczenia w trakcie eksploatacji wież (-20 °C), karby konstrukcyjne (bardzo sztywne węzły spawane) oraz wysoki stan naprężeń własnych charakterystyczny dla rur [6]. Jak wynika z relacji pracowników firmy Ruukki (dostawcy wyrobów), z powodu niezwykle wysokiego poziomu naprężeń własnych, rozcinanie rur wymaga bardzo dużej ostrożności i odpowiedniej technologii. Dobór odpowiedniego gatunku stali na tego typu konstrukcje (rurowe „na zewnątrz”) jest więc niezwykle istotny. W związku z tym, że projektant przyjął stal konstrukcyjną w gatunku St3S (R35), to wykonawca powinien użyć co najmniej stali S235J2, a jak wykazały badania i specyfikacje materiałowe, zastosowano stal S235JR.

Ze względu na znaczne speknięcia oraz dziwną postać zniszczenia (szczególnie w segmencie V) dodatkowo przeprowadzono badania udarności w temperaturze -20 °C dla stali zastosowanej w wyższej wieży. Badania wykonano na próbkach pobranych z dwóch segmentów I (próbki: BB. 913.49-03513.002.003 i BB. 913.49-03513.002.004) oraz V (próbki: BB. 913.49-03513.003.005 i BB. 913.49-03513.003.006). W związku z tak dużą rozbieżnością wyników badań

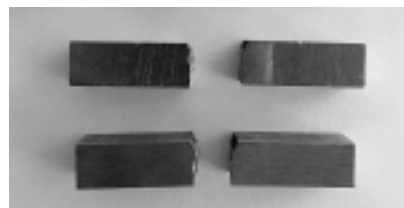
Wyniki pomiarów próbek: promienia zaokrąglenia dna karbu oraz kąta karbu, a także zaabsorbowanej energii

Numer próbki	Promień R [mm]	Kąt karbu	Energia zaabsorbowana KV ₂ [J]	Średnia energia zaabsorbowana KV ₂ śr. [J]
BB. 913.49-03513.002.003	0,260	44°26'	38,9	38,3
BB. 913.49-03513.002.004	0,254	45°44'	37,7	
BB. 913.49-03513.003.005	0,262	45°40'	7,4	6,4
BB. 913.49-03513.003.006	0,264	45°31'	5,5	

(tabela) na fotografiach 3 i 4 przedstawiono próbki po zniszczeniu. Wyraźnie widać różnice w formie zniszczenia.



Fot. 3. Próbką BB. 913.49-03513.002.003 i BB. 913.49-03513.002.004



Fot. 4. Próbką BB. 913.49-03513.003.005 i BB. 913.49-03513.003.006

Próbki z segmentu I (BB. 913.49-03513.002.003 i BB. 913.49-03513.002.004) pękły w pełni ciągliwie, a próbki z segmentu V (BB. 913.49-03513.003.005 i BB. 913.49-03513.003.006), gdzie stwierdzono dziwną formę zniszczenia, pękły krucho. Potwierdzały to również odgłosy zniszczenia próbek. Próbkę segmentu I pękały wydając dźwięk metaliczny, a próbki z segmentu V dźwięk głuchy. Badania udarności wykazały, że w przypadku segmentu V zastosowana stal S235JR przekroczyła próg kruchości. Potwierdzono też, że stale różnią się składem chemicznym. Oba materiały pochodzą z tej samej wieży (wysokości 30,0 m), ale z różnych segmentów (I i V). Stal z segmentu I zawierała 1,290% Mn, natomiast z segmentu V – jedynie 0,447%, co w pełni tłumaczy różne zachowanie się próbek w niskiej temperaturze (-20 °C).

Koncepcje naprawy

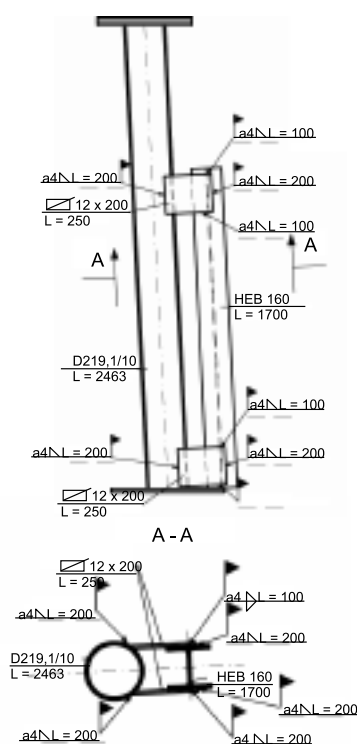
Zaproponowano wymianę uszkodzonych części krawężników wieży. W tym celu zalecono wycięcie uszkodzonej części rury i wspawanie w to miejsce nowej. Wymieniony segment krawężnika należa-

ło przyspawać do istniejącej konstrukcji spoiną czołową grubości równej grubości ścianek. Zalecono, aby przed przystąpieniem do wycinania uszkodzonego fragmentu przyspawać dodatkowy „bypass” (rysunek 3). Po wstawieniu nowej części rury i jej przyspawaniu „bypass” należało usunąć.

W celu niedopuszczenia do powtórzenia się uszkodzeń zalecono, w przeciwieństwie do propozycji projektanta, rozszczelnienie rur przez wykonanie otworów $\varnothing 12$ mm u góry i maksymalnie u dołu (tuż nad blachą kołnierkową) każdego segmentu. Takie rozszczelnienie rur spowoduje mniejszy ubytek korozyjny niż jednorazowe coroczne opróżnianie „szczelnie zamkniętych” rur (otwory gwintowane i zaślepione śrubą). Zalecono też monitorowanie postępu korozji przez okresowe nieniszczące pomiary grubości.

Podsumowanie

Na podstawie wizji lokalnych i przeprowadzonych analiz można sformułować wniosek ogólny, że stosowanie konstrukcji z rur na zewnątrz wymaga zachowania du-



Rys. 3. Zaprojektowane wzmocnienie na czas naprawy w formie „bypassu”

żej staranności podczas wykonania. Praktycznie trudno jest uzyskać pełną szczelność wewnętrznych przestrzeni w rurach. Korzystniejszym rozwiązaniem wydaje się więc realizacja krawężników z profili otwartych. Należy też podkreślić, że po wprowadzeniu stali konstrukcyjnych o różnej kruchości, zwłaszcza w temperaturze ujemnej (wg PN-EN 10025: 2007 i PN-EN 10027-1: 2007), należy się bacznie przyglądać wyborowi stali konstrukcyjnej na elementy zewnętrzne.

Literatura

- [1] Kurzawa Z.: Stalowe konstrukcje prętowe. Część II. Struktury przestrzenne, przekrycia cięgienowe, maszty i wieże. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2011.
- [2] Rykałuk K.: Konstrukcje stalowe, Kominy, Wieże, Maszty. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2005.
- [3] PN-B-03204: 2002, Konstrukcje stalowe, Wieże i maszty, Projektowanie i wykonanie.
- [4] PN-B-02011: 1997, Obciążenia w obliczeniach statycznych, Obciążenia wiatrem.
- [5] PN-B-02011: 1977/Az1: 2009, Zmiana do Polskiej Normy, Obciążenia w obliczeniach statycznych.
- [6] Rykałuk K.: Pęknięcia w konstrukcjach stalowych. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, 2000.

„ELTUR-SERWIS” Sp. z o. o. świadczy kompleksowe usługi budowlano-montażowe, remontowe oraz serwisowe dla sektora energetycznego w zakresie:

- projektowania,
- organizacji budowy,
- dostaw materiałów i urządzeń,
- wykonawstwa,
- nadzoru,
- kontroli jakości,
- serwisowania gwarancyjnego i pogwarancyjnego.

Gwarancją wysokiej jakości wytwarzanych produktów oraz terminowo i kompleksowo realizowanych usług przy zapewnieniu bezpieczeństwa ludzi oraz dbałości o ochronę środowiska naturalnego jest Zintegrowany System Zarządzania zgodny z normami: PN-EN ISO 9001:2009, PN-EN ISO 14001:2005, PN-N-18001:2004, PN-EN ISO 3834:2-2007. System jest certyfikowany przez UDT-CERT w Warszawie.

