



KATASTROFA BUDOWLANA ALUMINIOWEGO MASZTU Z ODCIĄGAMI

JERZY SENDKOWSKI, *jerzysendkowski[at]ankra.pl*

Biuro Budowlane Ankra sp. z o.o. Kielce

ANNA TKACZYK

ŁUKASZ TKACZYK

Biuro Budowlane Bauko s.c. Kielce

Streszczenie: W pracy opisano katastrofę budowlaną aluminiowego masztu telekomunikacyjnego z odcciągami o wysokości 80 m, po około 6 miesiącach eksploatacji od chwili wybudowania. Katastrofa miała miejsce w czasie porywów wiatru o niezbyt dużych prędkościach, mniejszych od przyjmowanych wartości charakterystycznych dla przedmiotowej strefy obciążenia wiatrem. Po przeprowadzonych badaniach materiałowych, wytrzymałościowych, obliczeniach i analizie zebranych materiałów ustalono, że przyczyną powstania katastrofy było kaskadowe wysunięcie się lin z zacisków i utrata stateczności położenia aluminiowego masztu. Niska wartość nośności zakotwienia pojedynczej liny była podstawowym błędem popełnionym na etapie projektowym i wykonawczym. Odstępstwo od procedur projektowych, technologicznych i odbiorczych spowodowało zaprojektowanie i wykonanie montażu masztu z istotnymi wadami. Zwrócono uwagę na potrzebę przestrzegania wymogów EC9 w trakcie projektowania, wykonawstwa, montażu oraz eksploatacji konstrukcji aluminiowych, tak, aby spełnione były wymogi niezawodności.

Słowa kluczowe: katastrofa budowlana, maszt kratowy, konstrukcje aluminiowe, niezawodność.

1. Opis konstrukcji aluminiowego masztu z odcciągami

Przedmiotem opracowania jest aluminiowy maszt telekomunikacyjny o wysokości 80 m, zlokalizowany w pierwszej strefie wiatrowej w odkrytym terenie na niewielkim wzniesieniu (304 m n.p.m.).

Przedmiotowy maszt zaprojektowano, jako konstrukcję składającą się z 24 typowych segmentów o długości 3,00 m każdy, segmentu podporowego o długości 6,0 m oraz segmentu końcowego o długości 2,0 m. Na ostatnim segmencie masztu przewidziano szpicę odgromową o wysokości 1,0 m. Konstrukcję trzonu zaprojektowano ze stopu aluminium gatunku EN AW6005A T6. Segmenty zaprojektowano z rur okrągłych. Krawężniki masztu z rur $\phi 80 \times 5,0$ mm (od poziomu 0,0 do poziomu 6,0 m), oraz z rur $\phi 80 \times 3,0$ mm (od poziomu 6,0 do poziomu 81,0 m). Skratowania poziome i krzyżulce zaprojektowano z rur $\phi 35 \times 2,0$ mm. Wszystkie połączenia przewidziano, jako spawane metodą TIG w osłonie argonu. Pręty skratowań przewidziano łączyć z krawężnikami spoinami czołowymi na pełny przetop. Połączenia segmentów zaprojektowano, jako doczołowe, śrubowe na 3 śruby M10 $\times$ 35 klasy 5.8. Kołnierze w połączeniu zaprojektowano z aluminiowej blachy płaskiej w kształcie sześciokąta o grubości 5,0 mm. Kołnierze wzmocniono żebrami z blach również o grubości 5,0 mm. W żebrach przewidziano otwory o średnicy 11 mm do mocowania lin odcciągów.

Odciągi zaprojektowano z lin ocynkowanych grubości 5,0 mm, $R_m = 1770$ MPa T6 $\times$ 7 wg PN-69/M-80208. Liny odcciągów mocowano za pomocą szekli prostych G4153 o $d = 10$ mm. Pętle lin przewidziano skręcać na zaciski linowe w ilości 3 szt. w rozstawie, co 5 średnic liny.

Segment podstawy masztu zaprojektowano o zbieżnych krawężnikach zakończonych wspólną rurą 190×5 mm z otworem na przegub ze śrubą M24×240 klasy 5.8.



Rys. 1. Widok aluminiowego masztu telekomunikacyjnego M100F o wysokości 80,0 m, tuż po katastrofie

Główne projektowe parametry techniczne masztu to: wysokość – 80,0 m + 1,0 m szpica odgromowa, rozstaw poprzeczny krawężników 1000 mm (wymiar w osiach), ilość segmentów 33 (1×6,0 m + 24×3,0 m + 1×2,0 m + szpica odgromowa), ilość odciegów 33 w trzech płaszczyznach pionowych, co 120°, poziomy odciegów (+6,0; +15,0; +24,0; +33,0; +39,0; +45,0; +51,0; + 60,0; + 66,0; + 72,0; + 78,0), z projektowanym wstępnym naciągami 1,8 kN.

Posadowienie masztu zaprojektowano na studni fundamentowej z kręgów betonowych o średnicy $d = 1,2$ m. Środek studni proponowano wypełnić betonem klasy C12/15. Kręgi betonowe zamierzano zagłębić w warstwie nośnej (grunty skaliste zaliczone do skał twardych z przewarstwieniami w postaci łupków) na głębokość 0,2 m licząc od stropu wydzielonej nośnej warstwy. Pod stopą fundamentową zaproponowano chudy beton klasy C8/10. Na podstawie rozpoznania geotechnicznego w miejscu posadowienia masztu, wód gruntowych nie nawiercono. Występujące warunki gruntowe zaliczono do złożonych a projektowany maszt zaliczono do II kategorii geotechnicznej.

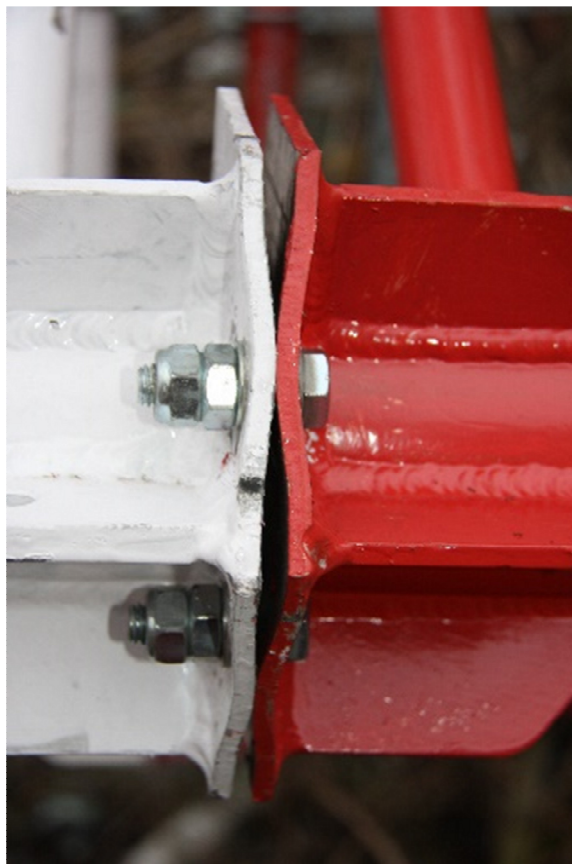
Zakotwienie odciegów zrealizowano za pośrednictwem stalowej płyty o wymiarach 0,5×1,0 m i grubości 5 mm usztywnionej od spodu, stosując kotwę gruntową o średnicy 20 mm i długości 3,0 m. Poziom zakotwienia kotwy gruntowej wynosił –2,7 m. Przewidziano zasypanie kotew gruntowych piaskiem, z jednoczesnym zagęszczeniem bryły wykopu.

2. Katastrofa budowlana aluminiowego masztu telekomunikacyjnego

Na początku 2014 r, podczas porywów wiatru (wg danych uzyskanych z IMiGW, SHM Suków maksymalna prędkość wiatru w porywach wynosiła 64.8 km/h) doszło do katastrofy budowlanej masztu telekomunikacyjnego M100F o wysokości 80,0 m. Nastąpiło kaskadowe wysuwanie się lin z zacisków i w konsekwencji utrata stateczności położenia aluminiowego masztu. Stan masztu po katastrofie pokazano na rys. 1 do 7.



Rys. 2. Widok uszkodzonych połączeń kołnierzowych



Rys. 3. Szczegółowy widok uszkodzonego połączenia kołnierzowego



Rys. 4. Widok segmentu podstawy masztu bezpośrednio po awarii





Rys. 5. Widok stanu lin odciegów w zakotwieniu po awarii



Rys. 6. Widok stanu lin odciegów w zakotwieniu po awarii



Rys. 7. Widok stanu podpory masztu po awarii

3. Opis badanych elementów konstrukcji masztu, po awarii

Przeprowadzono badania materiałowe oraz badania wytrzymałościowe zakotwień lin zniszczonego w katastrofie budowlanej masztu. Badania przeprowadzono w Certyfikowanym Laboratorium Politechniki Krakowskiej. Do badania pobrano próbki materiału z krawężników i wykratowania.

Przeprowadzono badania zakotwienia lin wykonanych analogicznie jak w maszcie, który uległ katastrofie (rys. 6). Zastosowano nowe zaciski ogólnie dostępne, po 3 sztuki, jak przewidywał projekt. Otrzymane wyniki badań materiałowych przedstawiono w tabeli 1. Ścieżki równowagi badanych zakotwień przedstawiono na rysunku 9, a wartości uzyskanej nośności granicznej zakotwień pokazano w tabeli 2. Nośność zakotwień cechuje niska wartość oraz bardzo duża zmienność (38%).

Tabela 1. Badania materiałowe stopu aluminium [MPa]

Element	Nr próby	R_{p01}	$R_{p01, m}$	R_{p02}	$R_{p02, m}$	R_m	$R_{m, m}$
Rura 35/2	LB/24/14-7	225	227,75 $x\sigma-1 = 5,6$ $n = 8$ min. 221 max. 240	248	245,25 $x\sigma-1 = 4,5$ $n = 8$ min. 241 max. 254	269	270.00 $x\sigma-1 = 6,5$ $n = 8$ min. 260 max. 277
	LB/24/14-8	240		254		277	
Rura 80/3	LB/24/14-1	221		241		269	
	LB/24/14-2	230		247		276	
	LB/24/14-3	227		243		270	
	LB/24/14-4	228		246		277	
	LB/24/14-5	226		241		260	
	LB/24/14-6	225		242		262	

Tabela 2. Zestawienie wyników nośności zakotwienia lin [kN]

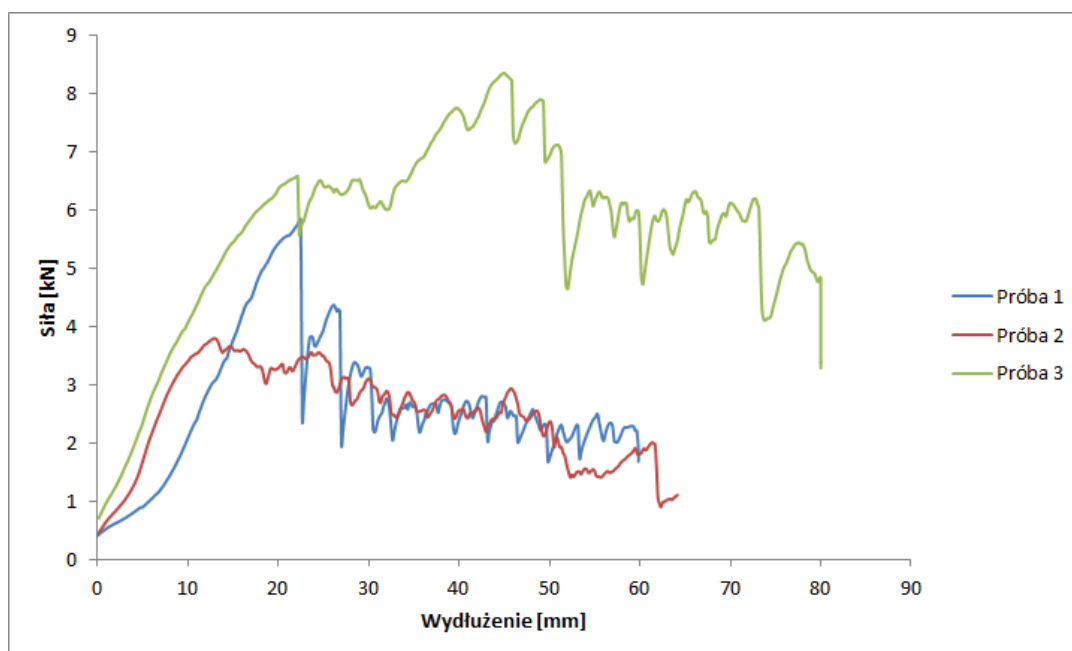
Nr próby	Nośność graniczna N_i	N_m [kN]	Uwagi
Próba 1	5,80	5,99 $x_{\sigma-1} = 2,29$ $n = 3$ min. 3,80 max. 8,36	$v = 2,29/5,99 = 0,38 = 38\%$
Próba 2	3,80		
Próba 3	8,36		



Rys. 8a. Widok badanego zakotwienia liny odciągu w maszynie wytrzymałościowej



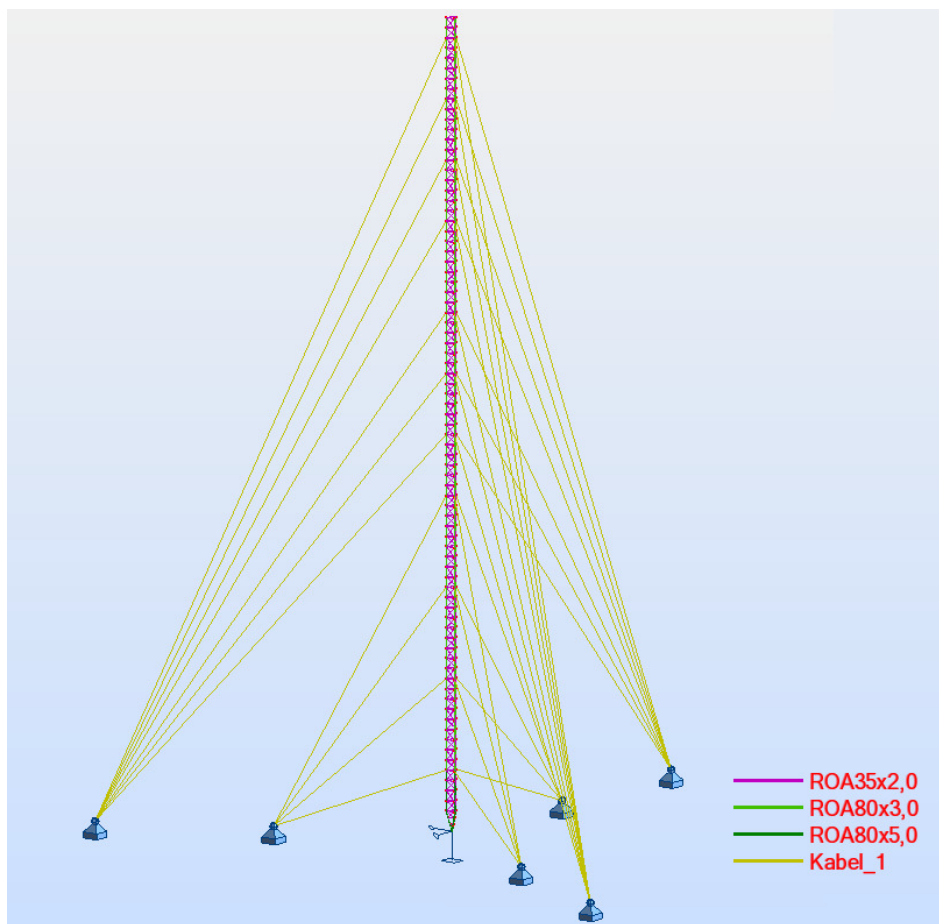
Rys. 8b. Widok zakotwienia liny odciągu po badaniu – wysunięcie liny z zacisków

Rys. 9. Ścieżki równowagi badanych zakotwień lin ϕ 5 mm

4. Obliczenia sprawdzające

Przeprowadzono obliczenia statyczne i dynamiczne za pomocą programu Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2015 korzystając z zaleceń podanych w pozycjach literaturowych [1–9]. Otrzymano następujące wyniki opisujące prawdopodobny mechanizm zniszczenia i grę sił w odciągach w chwili awarii:

- prawdopodobne wyteżenie odciągów przy zrealizowanym sposobie zakotwienia lin (bez kausz, trzy zaciski, bez atestów, usytuowane dowolnie po długości, niezgodnie z PN-73/M-080241, z niekontrolowanym naciągiem wstępnym) odpowiadające prędkości wiatru w czasie wystąpienia awarii ($64.4 \text{ km/h} = 18.0 \text{ m/s}^2$) wynosiło $\approx 5.99 \text{ kN/9.22 mm}^2$ (649.7 MPa), przy $R_m/n = 1770 \text{ MPa}/4 = 442.5 \text{ MPa}$,
- rzeczywiste obciążenie masztu mierzone prędkością wiatru, rozumianą, jako jednocyklowe oddziaływanie, odpowiadające zbadanej średniej nośności połączenia (649.7 MPa) oszacowano na ok. 6.2 m/s^2 (22.2 km/h),
- na podstawie obserwacji zachowania się zacisków w trakcie prowadzonych badań wytrzymałościowych, w trakcie przygotowania elementów próbnych, w aspekcie cykliczności oddziaływania wiatru, nośność zacisków oceniono poniżej 3.8 kN , (412 MPa), prędkość przykładanego obciążenia w trakcie badań miała znaczenie na kształt i wartości ścieżki równowagi badanych zakotwień lin (badania przeprowadzono przy prędkości narastania przemieszczeń odpowiadającej badaniom statycznym, 10 mm/min).



Rys. 10. Model obliczeniowy masztu w analizie globalnej

W opisanej katastrofie budowlanej, wystąpił brak spełnienia podstawowego warunku projektowego, a mianowicie wymaganej nośności zakotwienia lin. Spotęgowane było to niedostosowaniem naciągu wstępnego lin na poszczególnych poziomach masztu (przyjęto w projekcie jednakowy naciąg wstępny lin równy 1.8 kN), brakiem możliwości regulacji naciągu. Doprowadziło to w końcowym efekcie do nierównomiernego rozkładu sił w odciegach, a w niektórych wręcz do zlikwidowania naciągu wstępnego (można było to stwierdzić na drugim analogicznym maszcie o wysokości 60 m, usytuowanym w sąsiedztwie, a zaprojektowanym i wykonanych przez tego samego wykonawcę). Wywołało to kolejne przeciążenie innych odciegów, zrealizował się kaskadowy model zniszczenia zakotwień a w końcowym efekcie nastąpiła utrata stateczności położenia i upadek masztu.

W wyniku przeprowadzonych obliczeń wykazano, że przyczyną powstania awarii masztu była utrata stateczności położenia masztu w zrealizowanych warunkach konstrukcyjnych lin odciegów. Brak wymaganej nośności zakotwienia lin był kluczową przyczyną zaistniałej katastrofy budowlanej masztu aluminiowego. Niezależnie od powyższego zaprojektowany (wg reguł odpowiadających masztom stalowym) i wykonany maszt nie spełniał wymogów stanu granicznego nośności, a w konsekwencji i wymogów niezawodności.

5. Wnioski

Z przeprowadzonego rozpoznania wynika, że bezpośrednią przyczyną katastrofy budowlanej masztu aluminiowego była rażąco niska nośność zakotwienia lin, wywołana błędami projektowymi, a dopełniona niewłaściwym wykonawstwem (montażem i odbiorem).

Do powstania katastrofy budowlanej przyczyniło się zaprojektowanie, wybudowanie i użytkowanie masztu aluminiowego bez zapewnienia, jakości, stosownie do wymagań normy PN-EN 1090-2, bez uwzględnienia klasy konsekwencji zniszczenia CC, klasy niezawodności RC, kategorii projektowanego okresu użytkowania, klasy wykonania konstrukcji aluminiowej masztu EXC, a także poziomu nadzoru DSL i inspekcji IL.

Literatura

1. PN-EN 1990. Eurokod. Podstawy projektowania konstrukcji. PKN Warszawa 2004.
2. PN-EN 1991-1-4. Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Część 1–4: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania wiatru. PKN Warszawa 2008.
3. PN-EN 1090-3. Wykonanie konstrukcji stalowych i aluminiowych. Część 3: Wymagania techniczne dotyczące konstrukcji aluminiowych. PKN Warszawa 2012.
4. PN-EN 1999-1-1. Eurokod 9. Projektowanie konstrukcji aluminiowych. Część 1–1: Reguły ogólne. PKN Warszawa 2011.
5. PN-EN 1999-1-3. Eurokod 9. Projektowanie konstrukcji aluminiowych. Część 1–3: Konstrukcje narażone na zmęczenie. PKN Warszawa 2011.
6. Gwóźdź M. Problemy projektowe współczesnych konstrukcji aluminiowych, „Czasopismo Techniczne”, z. 4 (4-A/2017), Kraków 2007.
7. Gwóźdź M. Stany graniczne konstrukcji aluminiowych. „Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej”, Kraków 2007.
8. Gwóźdź M., Kuchta K. Zarządzanie niezawodnością obiektów kubaturowych wg norm PN-EN 1990. „Czasopismo Techniczne”, z. 11 (2-A/2/2011), Kraków 2011.
9. Gwóźdź M. Konstrukcje aluminiowe. Projektowanie wg Eurokodu 9. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej (monografia), Kraków 2014.
10. Wichtowski B., Hałas R., Przyczyny stanu przed awaryjnego aluminiowych masztów antenowych w świetle badań. Awarie Budowlane 2011, XXV Konferencja Naukowo-Techniczna, Międzyzdroje, 24–27 maja 2011.
11. Gutkowski W., Przyczyny i przebieg zniszczenia masztu radiowego w Gąbinie, Inżynieria i Budownictwo, 9, 1992, 346–348.

12. Ciesielski R., O katastrofach i defektach stalowych masztów radiowo-telewizyjnych. *Inżynieria i Budownictwo*, 3, 1992, 73–78.
13. Żółtowski W., Kleśta L., Katastrofa masztu radiowego w Gąbinie. Przyczyny, przebieg, skutki, *Inżynieria i Budownictwo*, 9, 1992, 340–346.
14. Pierzak L., O przyczynach zawalenia się masztu w Gąbinie, *Inżynieria i Budownictwo*, 9, 1992, 352–353.
15. Niewiadomski J., Głąbik J., Grochowski L., Analiza przyczyn katastrofy masztu w Gąbinie, *Inżynieria i Budownictwo*, 9, 1992, 349–351.

FAILURE OF ALUMINUM GUYED MAST

Abstract: In the presented paper there is a failure of 80 m aluminum telecommunications mast with guy lines discussed in detail. The failure has taken place after 6 months serviceability. It has occurred after gusts of winds of moderate speeds, that was lower than that, which was adopted for the calculation. After studies in materials, strength, calculation and analysis of the collected material there was found that the cause of the crash was cascading eject the ropes of the terminals and loss of stability of the aluminum mast. The low value of the capacity of a single rope anchorage was a fundamental mistake, that was carried out at all stages of construction process. Derogation from the design procedures, technology and receiving caused designing and the assembling of the mast with significant disadvantages. Drew attention to the need to comply with the requirements of EC9 during the design and assembly process aluminum structures to meet the requirements of reliability.

Keywords: construction crash, truss pole, aluminum structures, reliability.