



KATASTROFA BUDOWLANA ALUMINIOWEGO MASZTU KRATOWEGO JAKO EFEKT RAŻĄCYCH BŁĘDÓW PROJEKTOWYCH

MARCIN SKWAREK, *marcin.skwarek@pracowniaprojektowa.com.pl*
Pracownia Projektowa M. Skwarek, J. Hulimka Sp. J.

JACEK HULIMKA
Katedra Inżynierii Budowlanej, Politechnika Śląska

Streszczenie: Referat niniejszy przedstawia przypadek masztu kratowego, ze stalowymi odciągami linowymi i lekkim trzonem wykonanym ze stopu aluminium, który uległ katastrofie budowlanej po niespełna ośmiu miesiącach eksploatacji. Konstrukcja, którą można byłoby tu określić mianem nowoczesnej, o niewątpliwie wysokich walorach estetycznych, okazała się efektem realizacji wadliwego projektu. Co gorsza, był to projekt powtarzalny, który mimo rażących błędów i nieprawidłowości autoryzowany został przez uprawnionego projektanta.

Słowa kluczowe: maszt kratowy, maszt z odciągami, maszt aluminiowy, katastrofa.

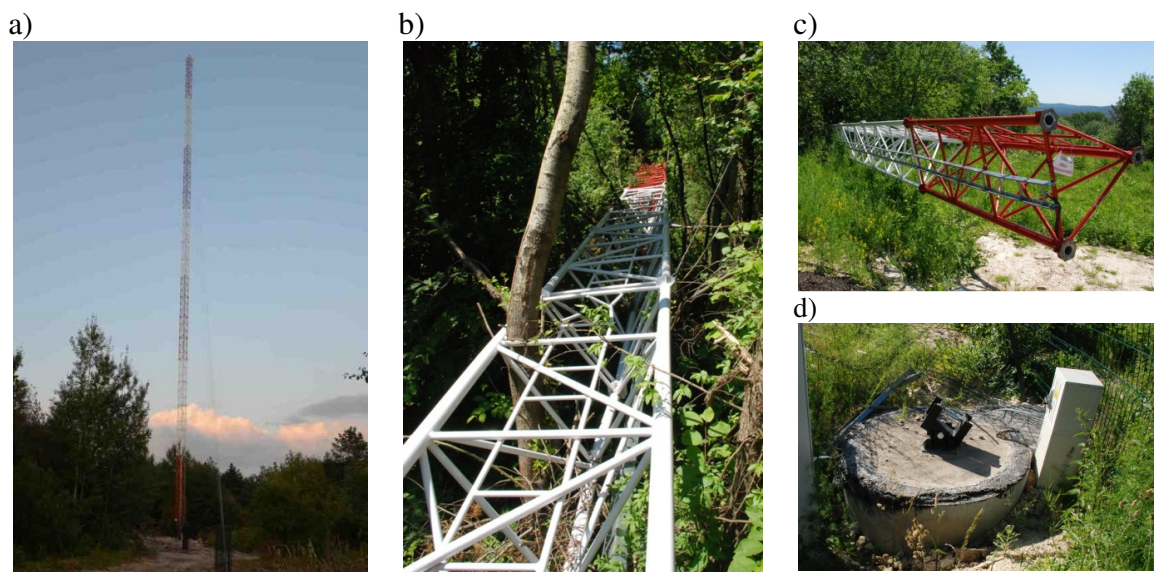
1. Wprowadzenie

Przedmiotem niniejszej pracy jest osiemdziesięciometrowy maszt z odciągami linowymi, z lekkim trzonem kratowym o podstawie trójkąta równobocznego, wykonanym ze stopu aluminium. Obiekt zrealizowany został jako adaptacja typowego projektu masztu powtarzalnego, pełniąc funkcję konstrukcji wsporczej instalacji telekomunikacyjnych. Uległ on katastrofie budowlanej, polegającej na przewróceniu się całego trzonu, w nieco ponad siedem miesięcy od daty wzniesienia. Przedstawiona w referacie wiedza autorów dotycząca omawianej konstrukcji wynika z prac przeprowadzonych w zakresie przygotowania ekspertyzy określającej przyczyny katastrofy. Należy przy tym wspomnieć, że prace autorów rozpoczęły się po kilku tygodniach od samego zdarzenia. Poprzedzone zostały one sporządzeniem opinii przez inny zespół autorski oraz wydaniem na tej podstawie decyzji przez Powiatowego Inspektora Nadzoru Budowlanego. Istotnym jest także fakt, że opisywana konstrukcja była projektowana i realizowana przez jedną firmę, która to firma także zatrudniała kierownika budowy.

2. Krótki opis konstrukcji masztu i ocena wybranych rozwiązań projektowych

Konstrukcję przedmiotowego masztu stanowił trzon kratowy, przestrzenny, zbudowany na planie trójkąta równobocznego o szerokości boku podstawy równej 1,0 m. Była to konstrukcja aluminiowa, której krawężniki (pasy kratownicy przestrzennej) wykonano z rur okrągłych o średnicy zewnętrznej 80 mm i grubości ścianek 3 i 5 mm. Skratowania, w układzie przekątniowym ze słupkami, wykonano z rur okrągłych o średnicy zewnętrznej 35 mm i grubości ścianki 2 mm. Trzon składał się z 24 segmentów powtarzalnych o wysokości 3,0 m, segmentu dolnego o wysokości 6,0 m (z dwukierunkowym, zawiasowym przegubem centralnym) oraz segmentu szczytowego o wysokości 2,0 m, stanowiącego część wspornikową. Segmenty łączone były ze sobą poprzez skręcane styki doczołowe krawężników. Zgodnie z projektem

trzon masztu utrzymywany miał być w pionie przez jedenaście zestawów odciągów linowych, ułożonych w trzech płaszczyznach co 120° (w osiach wysokości podstawy masztu), zaczepionych kolejno w poziomach: +6,0 m, +15,0 m, +24,0 m, +33,0 m, +39,0 m, +45,0 m, +51,0 m, +60,0 m, +66,0 m, +72,0 m oraz +78,0 m. W rzeczywistości zastosowano dziesięć zestawów odciągów, jak na rys. 4, choć w oświadczeniu kierownika budowy potwierdzono realizację konstrukcji wg projektu, bez jakichkolwiek zmian. Do zakotwienia lin zaprojektowano tzw. kotwy gruntowe (opisane w dalszej części tekstu). Pierwsze pięć z podanych wyżej zestawów odciągów (licząc od dołu) mocowane miało być do kotew usytuowanych w odległości poziomej (mierzonej w rzucie) 20,0 m od osi trzonu, a kolejne sześć do kotew oddalonych o 40,0 m od osi masztu (w rzucie). Do wykonania odciągów, zgodnie z projektem, zastosowana miała być lina stalowa wielosplotowa wg normy PN-69/M-80208, tj. o konstrukcji T6×37+A (w projekcie zapisano T6×7), o średnicy nominalnej $d = 5$ mm. W rzeczywistości zastosowano linę tej samej średnicy, lecz jednosplotową, o konstrukcji T1×19. Liny mocowano do trzonu i kotew za pomocą szekli i zacisków linowych. Zgodnie z projektem w każdej pętli zastosowane miały być trzy zaciski linowe w odległości co pięć średnic liny (tj. co 25 mm). W projekcie podano przy tym siłę naciągu wstępnego lin 1,8 kN, jednakową dla wszystkich zestawów. Do posadowienia trzonu przewidziano natomiast betonowy (niezbrojony) fundament centralny, wykonany poprzez wypełnienie betonem studni uformowanej z prefabrykowanych kręgów żelbetowych o średnicy 1,20 m.



Rys. 1. a) widok masztu przed katastrofą (po zakończeniu montażu);
b), c) widok fragmentów trzonu masztu po katastrofie; d) widok „fundamentu” centralnego

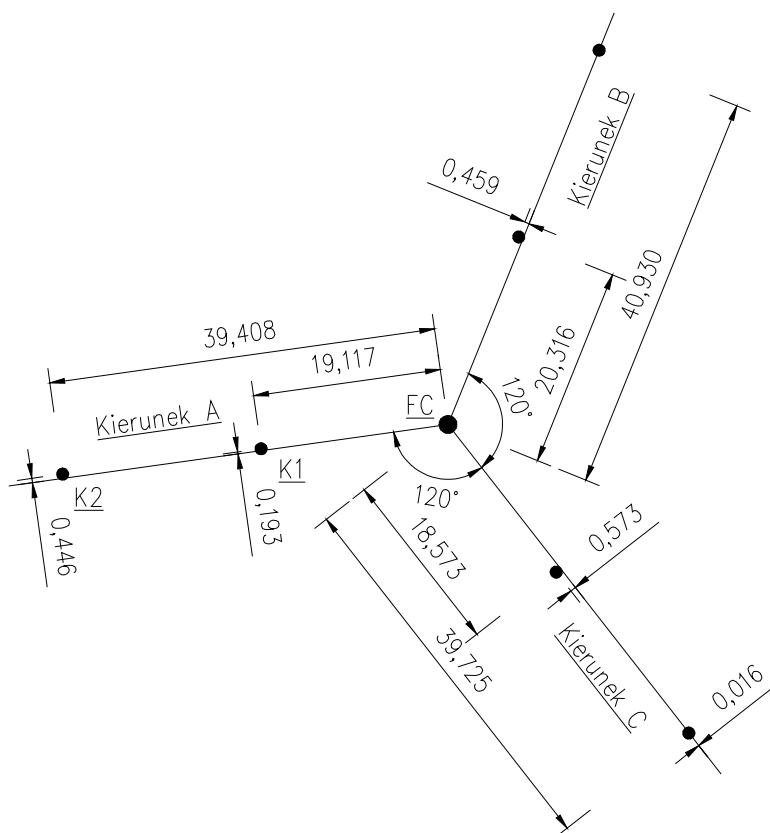
Analizując opisane wyżej rozwiązania projektowe masztu, pierwszą i wręcz uderzającą kwestią jest tu kuriozalny wręcz sposób posadowienia konstrukcji, a szczególnie zakotwienia lin odciągów. Wspomniana wcześniej kotwa gruntowa (rys. 2) to pojedynczy pręt stalowy o średnicy 20 mm i długości 2,8 m, zakończony w górnej części „uchem”, nagwintowany w dolnej części i połączony przy użyciu pojedynczej nakrętki ze stalową płytą oporową o wymiarach w rzucie 0,5×0,966 m. Element taki osadzany był bezpośrednio w wykopie, z pionowym ustawieniem pręta, i zasypywany gruntem rodzimym (wg projektu, co potwierdzono w dzienniku budowy – zagęszczonym piaskiem). Pomijając tu kwestie trwałości (korozyjności), autorzy zadają pytanie podstawowe: co i w jaki sposób miało tu zapewnić zakotwienie lin odciągów, a w szczególności opór kotwy przy działaniu poziomych składowych sił

przekazywanych z lin? Oczywistym jest tu, że siły naciągu wstępnego kolejnych lin oraz siły w nich powstające w warunkach eksploatacji musiały powodować przemieszczenia wierzchołka kotwy w gruncie, a tym samym obniżenie naprężeń wstępnych wciągach.



Rys. 2. „Zakotwienie” odciągów (opis w tekście): a) przykładowy widok przed katastrofą; b), c) odkrywka kotwy po katastrofie

Przechodząc dalej, do oceny sposobu zaprojektowania i wykonania odciągów masztu, ujawnia się kolejne rażące błędy projektowe. Autorzy domniemują tu, że osobom opracowującym projekt zabrakło sporo wiedzy i doświadczenia z zakresu projektowania tego typu elementów ciągnowych. Lakoniczność i ogólnikowość używanych w projekcie sformułowań każe wręcz ulec wrażeniu, iż czytamy opis sposobu wykonania sznura do suszenia bielizny. Przede wszystkim, projektantom (i jednocześnie wykonawcom) wydaje się nie robić jakiegokolwiek różnicy jakiej konstrukcji linę stosują, a ma to przecież oczywisty wpływ nie tylko na pole powierzchni przekroju metalicznego (drutów w splocie), ale przede wszystkim na wartość modułu sprężystości podłużnej, a więc w efekcie na różną wydłużalność cięgna.

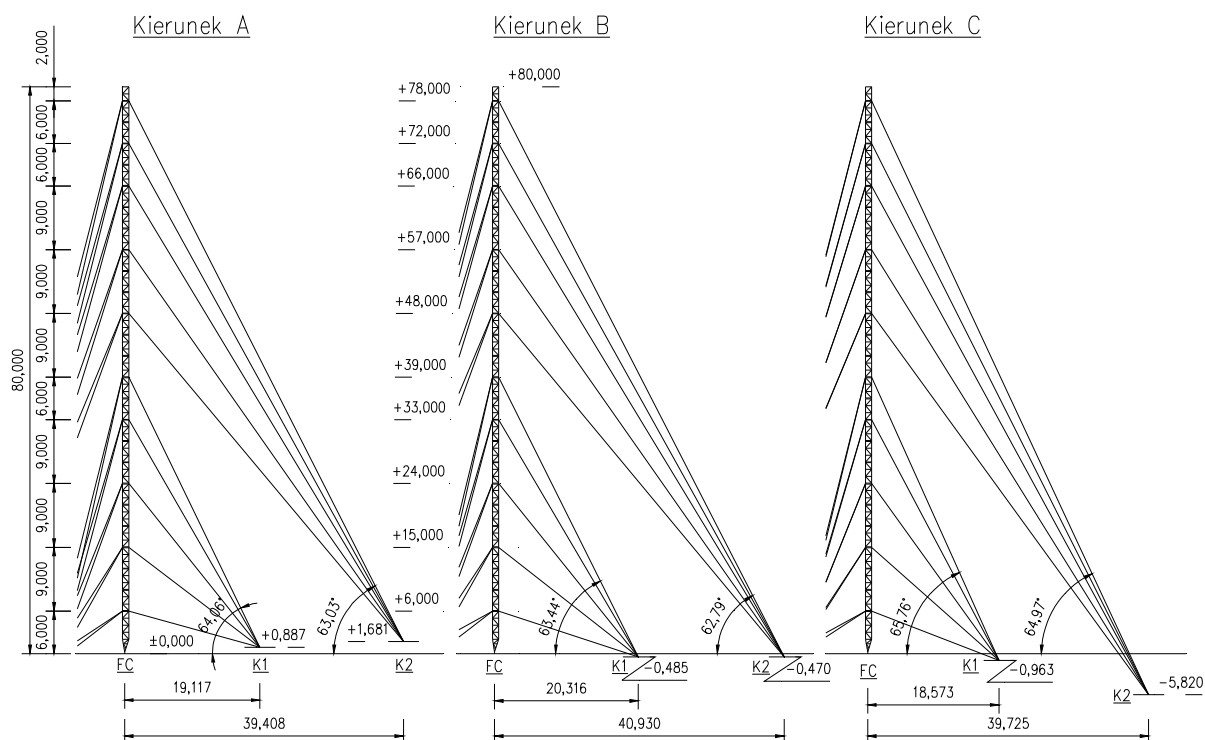


Rys. 3. Szkic z inwentaryzacji geodezyjnej wzajemnego położenia kotew

Zupełnie obcą wydaje się tu także potrzeba wstępnego przeciągania lin, wyraźnie wskazana w normach [5] i [4], a także [2], na którą powołano się w projekcie masztu. Średnia wartość modułu Younga liny stabilizuje się przecież dopiero po przeprowadzeniu serii jej wstępnych naciągnięć i odprężeń, o czym wyraźnie stanowią przywołane wyżej normy. Generalnie wydaje się, że w świadomości autorów projektu masztu nie funkcjonuje pojęcie odciągu (ciągną) jako elementu konstrukcji masztu, którego przygotowanie, dla zapewnienia bezpieczeństwa konstrukcji, wymaga dochowania określonych wymagań (choćby [2, 5], nie mówiąc o szczegółowych [4]). Odciąg masztu postrzegany jest tu raczej jak kawałek liny rozwiniętej z bębna, dowolnie zasznurowanej na końcach. Kuriozalnym jest też fakt niewprowadzenia (projektowo i fizycznie w realizacji) jakichkolwiek elementów (urządzeń) pozwalających na regulację siły wstępnego naciągu lin! Idąc dalej, autorzy niniejszej pracy stwierdzają, że dla projektanta i wykonawcy masztu (w rozumieniu tego samego podmiotu gospodarczego), niemal obojętne jest także, jak rozmieszczone zostaną w rzeczywistości względem siebie punkty kotwienia lin i oparcia trzonu – zarówno w planie, jak i wysokościowo. Projekt zakładał przecież usytuowanie kotew odciągów w równych odległościach od trzonu, a sądząc na podstawie podania jednej wartości siły naciągu wstępnego dla wszystkich lin – także na tym samym poziomie. Tymczasem, wykonana na potrzeby ekspertyzy inwentaryzacja geodezyjna pokazuje zupełnie co innego (rys. 3, 4). Sądzić można, że dla przedmiotowego masztu nie obowiązywały jakiegokolwiek normowe warunki wykonania w tym zakresie, choć w dokumentacji odbiorowej potwierdzono zgodność z [2]. Same różnice kątów nachylenia lin (rys. 4) powodują, że dla zachowania równowagi statycznej składowych poziomych sił naciągu wstępnego, musiały być one różnicowane w zakresie blisko 10% wartości. Protokół powykonawczy, pod hasłem „naciąg odciągów linowych”, zawiera jedno słowo: „TAK” (podobnie w odniesieniu do pionowości trzonu i stanu połączeń śrubowych). W efekcie ocenia się, że w linach wprowadzone zostały przypadkowe i nieznane wartości sił naciągu wstępnego. Biorąc więc pod uwagę szereg opisanych wyżej błędnych rozwiązań czy też zaniechań przy projektowaniu i realizacji zakotwień lin i samych odciągów stwierdzić należy, że konstrukcja masztu zaprojektowana została i zrealizowana w tym zakresie co najmniej niefrasobliwie, jeśli nie bezmyślnie, a już z pewnością w oderwaniu od podstawowych wymagań normowych i wbrew ogólnie pojętej sztuce budowlanej. W efekcie, tak podstawowy parametr tego typu ustroju jak podatność (sztywność) podpór sprężystych trzonu stał się tu dziełem przypadku – niemożliwą do sprecyzowania funkcją losową wielu niezależnych od siebie zmiennych losowych.

Wykazane wyżej błędy są tylko tymi najistotniejszymi z punktu widzenia ustalenia przyczyn katastrofy masztu. Opisanie wszystkich wad przedmiotowej konstrukcji, jej dokumentacji, zarówno projektowej jak i odbiorowej, a także sposobu realizacji, spowodowałoby istotne przekroczenie limitu objętości tekstu referatu. Autorzy chcą tu jednak podkreślić jeszcze jedną, zasadniczą kwestię. Otóż, jak podano w projekcie, konstrukcję masztu, z trzonem wykonanym ze stopu aluminium, zaprojektowano na podstawie normy [2]. Autorzy zwracają tu uwagę na fakt, że przy takich założeniach, wykonane obliczenia masztu, nawet jeśli byłyby bezbłędne, pozostaną tylko pewnym przybliżeniem – oszacowaniem o nieznanej dokładności. Zastępcze, statyczne metody [2] (czy też [5]) wyznaczania odpowiedzi dynamicznej masztu są bowiem przeznaczone dla konstrukcji stalowych. W omawianym przypadku, tj. trzonu wykonanego ze stopu aluminium o umownej granicy plastyczności bliskiej granicy plastyczności stali S235, mamy do czynienia z konstrukcją o zupełnie innym stosunku masy, a przede wszystkim wartości odkształceń (niższa wartość modułu sprężystości), do jej wytrzymałości. Odmienne są charakterystyki dynamiczne takiej konstrukcji, w tym zdolność tłumienia drgań. Jeszcze istotniejszym jest w tym świetle kwestia trwałości takiej konstrukcji, w rozumieniu jej wytrzymałości zmęczeniowej. Patrząc na tablice kategorii zmęczeniowych elementów konstrukcji aluminiowych wg [6], zdecydowanie niższe w odniesieniu do stalowych, mając też

świadomość większej ich odkształcalności, a więc i większych zakresów zmienności naprężeń, nietrudno stwierdzić, iż trwałość masztu aluminiowego będzie istotnie niższa w porównaniu do konstrukcji o jakich stanowi norma [2, 5]). Zatem miarodajne określenie trwałości konstrukcji przedmiotowego masztu, w opinii autorów, nie jest możliwe na podstawie procedur normowych [2], czy też [5, 3, 6]. Zauważyć także należy, że omawiana tu konstrukcja (trzon aluminiowy i stalowe odciągi) będzie zachowywała się odmiennie od typowej konstrukcji stalowej wg norm [2, 5] przy zmianach temperatur, a to na skutek różnej rozszerzalności termicznej materiału trzonu i odciągów.



Rys. 4. Schematyczny widok konstrukcji w kolejnych kierunkach lin odciągów wg rys. 3

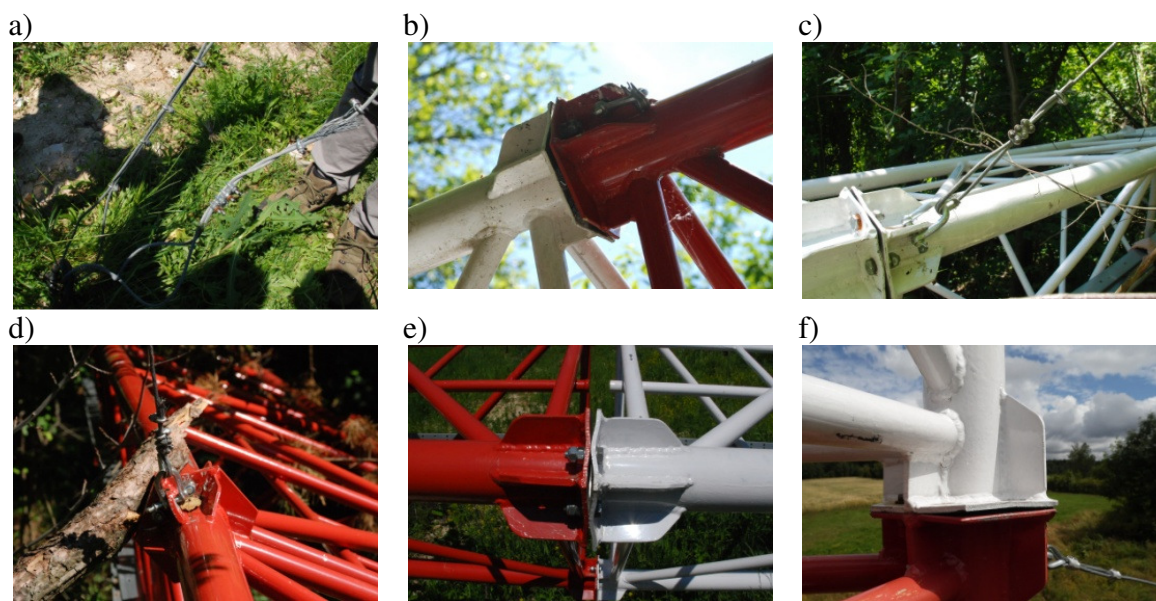
3. Identyfikacja uszkodzeń konstrukcji

Jak zaznaczono na wstępie pracy, pierwsze przeprowadzone przez autorów oględziny masztu miały miejsce w kilka tygodni po katastrofie, a poprzedzone zostały sporządzeniem opinii przez inny zespół autorski. Opinia ta, a szczególnie zamieszczona w niej dokumentacja fotograficzna i opis stanu konstrukcji bezpośrednio po katastrofie, stanowiła podstawę do identyfikacji uszkodzeń przez autorów niniejszej pracy. Pierwszym wynikiem oględzin autorów było bowiem stwierdzenie, że „wrak” masztu pozbawiony został najniższego (podporowego) i najwyższego segmentu trzonu oraz części lin odciągów.

Na podstawie oględzin własnych oraz dostarczonej dokumentacji stwierdzono następujące uszkodzenia konstrukcji:

- zniszczenie znacznej części pętli lin odciągów na kierunku A wg rys. 3 i 6a (całkowite lub częściowe), poprzez wyslizgnięcie się swobodnych końcówek lin z zacisków, zarówno przy kotwach gruntowych jak i w zaczepach lin do trzonu masztu – rys. 5a–5d; nie stwierdzono przy tym zerwania którejkolwiek z lin odciągów,

- rozerwanie centralnego elementu segmentu podporowego masztu w przegubie, na skutek docisku łącznika do ścianki otworów (powstałe już po utracie stateczności trzonu, na skutek jego upadku),
- rozwarcie (uplastycznienie) blach w stykach doczołowych krawężników – rys. 5b–5e; pierwotnie uszkodzenie to uznano za konsekwencję upadku masztu, jednak późniejsze oględziny identycznej konstrukcji o wysokości sześćdziesięciu metrów (rys. 5f) ujawniły, że uszkodzenia te w pewnym stopniu występowały także w trakcie eksploatacji konstrukcji, będąc efektem jej sporych odkształceń,
- uszkodzenia pojedynczych prętów trzonu kratowego, będące efektem uderzenia konstrukcji o podłoże lub konary i pnie drzew.



Rys. 5. Przykładowe uszkodzenia konstrukcji masztu (opis w tekście)

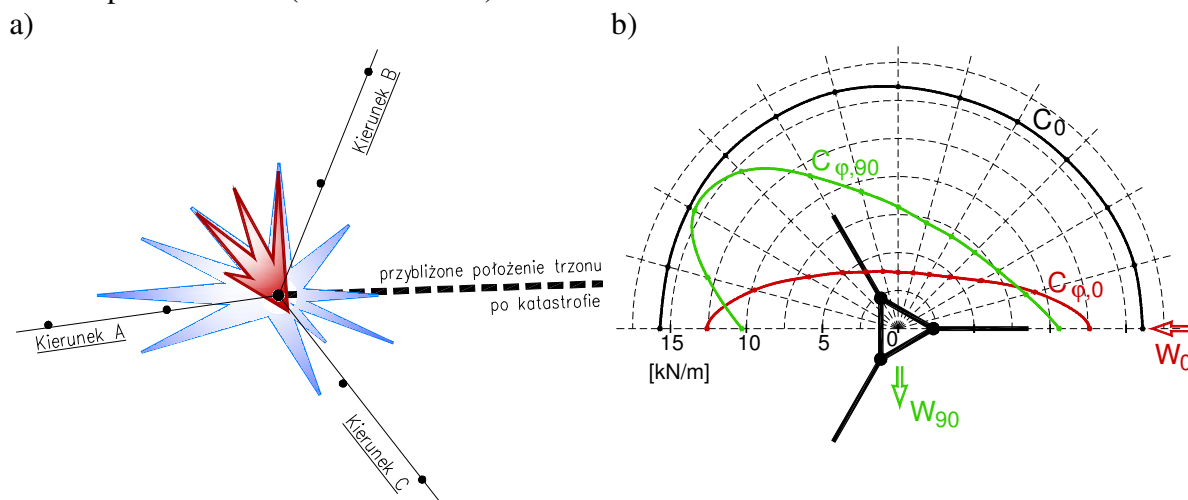
4. Ustalenie przyczyn katastrofy

Wspomniana wcześniej pierwsza opinia, poprzedzająca prace autorów referatu, jako przyczynę katastrofy podała wyslizgnięcie się lin odciągów z pętli, jako skutek zastosowania części zacisków linowych o rozmiarze ‘6’, co przytoczono w decyzji Powiatowego Inspektora Nadzoru Budowlanego. Z kolei projektant i wykonawca masztu powołał się na normę PN-73/M-080241, która dopuszcza do stosowania zacisków o rozmiarze ‘6’ do lin o średnicy 5 mm; jego zdaniem natomiast, do katastrofy doszło na skutek aktu wandalizmu.

W opinii autorów referatu trzeba zgodzić się z podstawowym wnioskiem pierwszej opinii i decyzji PINB, jednak ustalenie mechanizmu powstania katastrofy, a szczególnie przyczyn wyslizgnięcia się lin z pętli, wydaje się tu nazbyt powierzchowne i oderwane od merytorycznej oceny dokumentacji masztu i zastosowanych rozwiązań konstrukcyjnych.

W celu przeprowadzenia pełniejszej oceny sytuacji, autorzy referatu wystąpili o pozyskanie danych pozwalających ustalić historię obciążenia (wiatrem) konstrukcji w trakcie krótkiego okresu jej użytkowania. Uzyskane dane, pochodzące ze stacji Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej położonej w bliskiej odległości od miejsca katastrofy pokazały, że w całym okresie eksploatacji konstrukcji prędkość wiatru nie przekroczyła 70% wartości przewidywanej normą, a w dniu katastrofy, w chwili najsilniejszych porywów, nie przekraczała 50% wartości normowej. Katastrofa nastąpiła przy prędkości średniej dziesięciminutowej

odpowiadającej około 40% wartości normowej (bazowej). Rysunek 6a przedstawia rozkład kierunków chwilowych prędkości wiatru w całym okresie eksploatacji konstrukcji (kolor niebieski) oraz w dniu katastrofy (kolor czerwony), wraz z przybliżonym położeniem trzonu masztu po katastrofie (linia kreskowa).



Rys. 6. a) rozkład kierunków prędkości chwilowych wiatru i położenie trzonu masztu po katastrofie;
b) rozkład sztywności podpory sprężystej trzonu – przykład (opis w tekście)

Ponadto przeprowadzono szacunkowe obliczenia sprawdzające wg norm [1, 2, 3, 5], mające przede wszystkim na celu weryfikację poprawności obliczeń wykonanych w ramach projektu masztu. Obliczenia te wykonano dla teoretycznego układu punktów kotwienia lin oraz projektowej siły ich naciągu wstępnego. Stwierdzono, że podane w projekcie wartości maksymalnych przemieszczeń sprężystych trzonu, jak również wartości sił w linach odciągów, mogły być nawet dwukrotnie niedoszacowane. Nieco później, na podstawie kolejnych dokumentów dostarczanych przez projektanta konstrukcji stwierdzono, iż w swoich obliczeniach najprawdopodobniej nie uwzględnił on w ogóle działania wiatru na odciągi. Dodatkowo, na podstawie przeprowadzonych obliczeń sprawdzających, dokonano także oszacowania i analizy warunków sztywności podpar sprężystych trzonu masztu (opisane choćby w [7]), wyznaczając rozkłady ich sztywności początkowej C_0 oraz roboczej C_{ϕ} . Na rysunku 6b przedstawiono przykładowy taki rozkład, dla najwyższego zestawu odciągów. Stwierdzono, iż skutkiem dobrania lin o zbyt małym przekroju, przy działaniu wiatru „na jeden odciąg”, sztywność podpar sprężystych trzonu na kierunku poprzecznym do kierunku średniej prędkości wiatru wielokrotnie maleje, powodując zagrożenie utratą jego stateczności na kierunku poprzecznym do linii wiatru.

Biorąc pod uwagę powyższe autorzy referatu orzekli, że do zniszczenia pętli lin odciągów, tj. wyslizgnięcia się ich swobodnych końców z zacisków, doszło na skutek cyklicznego powstawania znacznych, coraz to większych i w zasadzie niemożliwych do określenia sił bezwładności, wynikających z nadmiernych drgań (amplitud przemieszczeniowych) trzonu masztu. Te z kolei spowodowane były obniżeniem wartości naprężeń wstępnych odciągów na skutek podatności (przemieszczeń) punktów ich kotwienia oraz trwałych wydłużeń lin spowodowanych brakiem wstępnego przeciągania, a także, wskutek utraty stateczności trzonu na kierunku poprzecznym do kierunku prędkości wiatru. Ten ostatni wpływ, patrząc na rys. 6a, zdaje się obrazować ostatnie chwile istnienia omawianej tu konstrukcji.

5. Podsumowanie

Można powiedzieć, że podsumowanie niniejszej pracy zostało już wcześniej sformułowane przez autorów referatu [8], dotyczącego analogicznych konstrukcji. Użyte tam określenie „analfabetyzm techniczny wyższego szczebla” zdaje się być najtrafniejszym, a w tym wypadku odnoszącym się do każdego etapu realizacji konstrukcji (od projektowania po zakończenie budowy). Można wręcz powiedzieć, że katastrofa budowlana przedmiotowego masztu była jego nieuchronnym przeznaczeniem, a fakt funkcjonowania wielu innych, podobnych, jest tylko dziełem przypadku. Pozostaje zadać pytanie: na czym polegał tu udział osób pełniących samodzielne funkcje techniczne w budownictwie, które złożyły swoje podpisy na kolejnych dokumentach? Czy fakt zatwierdzenia dokumentacji jest wynikiem braku wiedzy, czy też osoby te wartość swojej pracy wyznaczyły tylko miarą energii potrzebnej na złożenie pieczęci i podpisu, nie troszcząc się zbytnio o treść potwierdzanej nimi dokumentacji?

I na koniec: w dniu poprzedzającym przesłanie referatu do recenzji autorzy otrzymali wiadomość o zawaleniu się kolejnych dwóch masztów o analogicznej konstrukcji.

Literatura

1. PN-77/B-02011/Az1:2009 Obciążenia w obliczeniach statycznych. Obciążenie wiatrem, z poprawką Az1 z 2009 r.
2. PN-B-03204:2002 Konstrukcje stalowe. Wieże i maszty. Projektowanie i wykonanie.
3. PN-EN 1991-1-4 Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Część 1–4: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania wiatru.
4. PN-EN 1993-1-11 Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1–11: Konstrukcje ciągnowe.
5. PN-EN 1993-3-1 Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 3-1: Wieże, maszty i kominy. Wieże i maszty.
6. PN-EN 1999-1-3 Eurokod 9. Projektowanie konstrukcji aluminiowych. Część 1–3: Konstrukcje narażone na zmęczenie.
7. Rykaluk K. Konstrukcje stalowe. Kominy, wieże, maszty. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2007.
8. Wichtowski B., Hałas R. Przyczyny stanu przedawaryjnego aluminiowych masztów antenowych w świetle badań. XXV Konferencja Naukowo-Techniczna, Szczecin – Międzyzdroje 24–27 maja 2011 Awarie Budowlane 2011. Tom II, s. 899–906.

COLLAPSE OF EIGHTY-METER LATTICE MAST AS A RESULT OF MAJOR DESIGN ERRORS

Abstract: This paper presents the case of aluminum lattice mast with steel guys, collapsed after less than eight month of its use. This structure, which looked like modern, in fact was a result of incorrect typical design. Unfortunately, that design, with its many mistakes, has been approved by qualified designer, though this should not happen.

Keywords: lattice mast, guyed mast, aluminum mast, disaster.