

MARIAN GWÓZDŹ*

PROBLEMY PROJEKTOWE WSPÓŁCZESNYCH KONSTRUKCJI ALUMINIOWYCH

PROJECT PROBLEMS OF CONTEMPORARY ALUMINIUM STRUCTURES

Streszczenie

W niniejszym artykule podjęto próbę zainteresowania środowiska projektantów-architektów i konstruktorów stopami aluminium, które są w wielu zastosowaniach oceniane jako nowoczesny materiał konstrukcyjny uzupełniający, a nawet konkurencyjny do stali. Stan normalizacji obliczeń konstrukcji aluminiowych w Polsce nie jest zadowalający.

Oprócz treści merytorycznych związanych z badaniami podstawowymi konstrukcji aluminiowych, przedstawiono zasadnicze zmiany, jakie zaszły we współczesnych metodach obliczeń. Podano także wyniki badań własnych w zakresie bezpieczeństwa konstrukcji aluminiowych oraz właściwości mechanicznych stopów aluminium stosowanych w budownictwie.

Słowa kluczowe: budownictwo, konstrukcje aluminiowe, eurokod

Abstract

In the paper made an attempt to arouse architects and designers interest in aluminium alloys. In many applications, they are considered as a modern supplementary building material, some times competing even with a steel. Condition of Polish desing standard of aluminium structures are not satisfying. Together with factual content related to basic tests of aluminium structures, the paper presented fundamental changes in contemporary calculation methods. Results of the tests concernig the safety of aluminium structures and mechanical properties of alloy was presented in article.

Keywords: construction, aluminium structures, eurocode

*Dr hab. inż. Marian Gwóźdź, prof. PK, Instytut Materiałów i Konstrukcji Budowlanych, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Badania nad teorią konstrukcji aluminiowych były prowadzone w Europie w latach siedemdziesiątych i osiemdziesiątych XX w. Badania wcześniejsze prowadzone w latach pięćdziesiątych i sześćdziesiątych, głównie w USA, miały charakter badań eksperymentalnych. W Europie promotorem badań dotyczących konstrukcji aluminiowych jest F. M. Mazzolani [1], który stworzył szkołę europejską, aktywną po dzień dzisiejszy. Zwieńczeniem prac F. M. Mazzolaniego, G. De Matteisa, R. Landolfa i innych są rekomendacje europejskie Eurocode 9 (EC 9) [2]. Nowelizacją normy polskiej PN-64/B-03220 zajęła się Normalizacyjna Komisja Problemowa nr 128, której prace mają stworzyć „(...) *podstawy normalizacji w zakresie projektowania, wykonawstwa i montażu współczesnych konstrukcji aluminiowych, przy założeniu pełnej harmonizacji z normami europejskimi (...)*”. Prace te są opóźnione, ponieważ podstawę normalizacji krajowej ma stanowić Eurocode 9 z załącznikiem krajowym, który nie jest jeszcze zatwierdzony jako dokument obowiązujący. Trudności w projektowaniu konstrukcji aluminiowych dodatkowo pogłębiają przemiany systemowe w krajowym hutnictwie metali nieżelaznych oraz niezadowolający stan krajowych publikacji tematycznych.

Krajowe hutnictwo metali lekkich jest w okresie przekształceń i dostosowywania się do wymagań europejskich. Komisja Problemowa PKN nr 225 zaakceptowała w całości hutnicze normy europejskie, które przetłumaczono na język polski. Przemiany w hutnictwie prowadzą do zmian w asortymencie stopów aluminium przeznaczonych na konstrukcje budowlane. Są to stopy na ogół w Polsce dotychczas nie stosowane, znane jednak od lat w budownictwie europejskim. W szczególności na uwagę zasługują stopy Al zalecane w rekomendacjach EC 9 [2], normie brytyjskiej BS [3] oraz dokumencie ISO 11069-1 [4].

Spośród dostępnych w kraju podręczników z dziedziny konstrukcji aluminiowych należy wymienić klasyczną monografię prof. Romana Mromlińskiego, nowoczesną w latach sześćdziesiątych, jednak obecnie zdezaktualizowaną. Sygnałem korzystnych zmian w krajowej bibliografii w zakresie konstrukcji aluminiowych jest między innymi praca [5].

2. Prognoza popytu na konstrukcje aluminiowe w Polsce

Prognoza krajowego popytu na budowlane konstrukcje aluminiowe może być oparta na doświadczeniach innych państw europejskich, które są bardziej zaawansowane technologicznie i gospodarczo. Decyzje inwestycyjne wynikają tam z bilansu zalet i wad konstrukcji aluminiowych. Do podstawowych zalet konstrukcji aluminiowych należy zaliczyć:

- lekkość konstrukcji,
- odporność na korozję atmosferyczną,
- możliwość pełnego recyklingu materiału konstrukcyjnego,
- łatwość montażu, wzmocnień i demontażu,
- wysokie walory estetyczne,
- mały spadek wytrzymałości w niskich temperaturach.

Ponadto aluminium i jego stopy są łatwo urabialne, nie dają iskier przy obróbce mechanicznej oraz są niemagnetyczne.

Wadami stopów aluminium są:

- mała sztywność, która powoduje podatność na utratę stateczności,
- wysokie koszty wytwarzania,

- degradacja wytrzymałości poddanych pełnej penetracji termicznej stopów obrobionych cieplnie lub umocnionych zgniotem,
- brak ogniotrwałości (w temperaturze powyżej 60°C wytrzymałość stopów zaczyna spadać, a w temperaturze 120°C redukcja wytrzymałości wynosi już 50–75 %).

Podstawowym wskaźnikiem, uwzględnianym w procesie decyzyjnym może być lekkość materiału konstrukcyjnego κ [1/1000 m], zdefiniowana jako stosunek ciężaru objętościowego ρ [kN/m³] do wytrzymałości charakterystycznej f_k [MPa]

$$\kappa = \frac{\rho}{f_k}$$

W tabelicy 1 zestawiono obliczone wartości κ dla podstawowych materiałów konstrukcyjnych: żelbetu, drewna, stali i wybranych stopów aluminium.

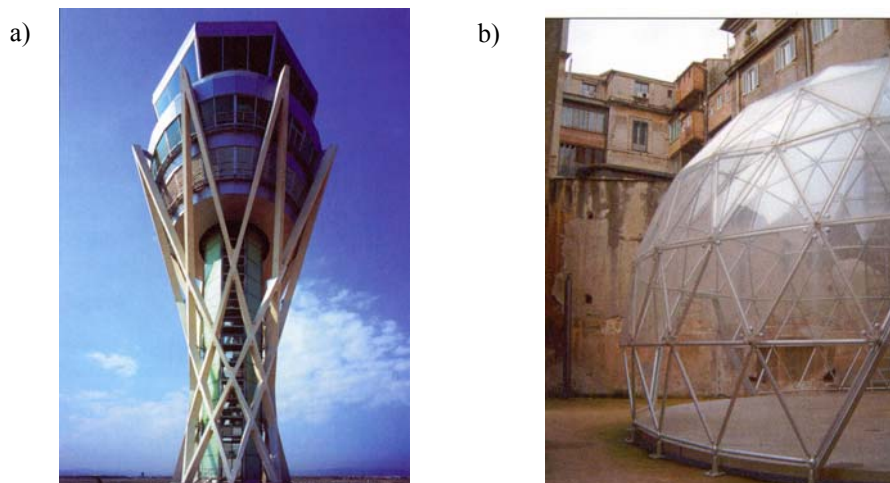
Tablica 1

Obliczone wartości parametru κ materiałów konstrukcyjnych

Beton	B15	B20	B25	B30	B37	B45	B50	B55	B60
κ	2,08	2,19	1,25	1,00	0,833	0,714	0,556	0,556	0,500
Drewno	Sosnowe i świerkowe				Warstwowo klejone				
	K21	K27	K33	K39	KL27	KL33	KL39	xxxx	xxxx
κ	0,286	0,222	0,182	0,154	0,259	0,212	0,179	xxxx	xxxx
Stal	S 235	S 275	S 355	S 420	S 450	S 460	xxxx	xxxx	xxxx
κ	0,334	0,285	0,221	0,187	0,174	0,171	xxxx	xxxx	xxxx
Stop Al	3103		5052	5083		6061		6082	
stan	H14	H16	H12	H22	H24	T4	T6	T4	T6
κ	0,225	0,186	0,169	0,135	0,115	0,245	0,113	0,245	0,104

Dla materiałów konstrukcyjnych, najczęściej stosowanych w obiektach o przeciętnych wymaganiach bezpieczeństwa, dane liczbowe w tabl. 1 wyróżniono czcionką wytłuszczoną. Porównując powyższe wartości liczbowe, można zauważyć, że beton jest materiałem najcięższym, stopy aluminium są najlżejsze, a stal i drewno pod względem lekkości są materiałami porównywalnymi. Korzystny dla konstrukcji aluminiowych wskaźnik κ nie równoważy jednak niekorzystnej relacji kosztów wytwarzania aluminium i stali. Cena jednostkowa hutniczych wyrobów aluminiowych jest 5–6 razy wyższa niż analogicznych wyrobów stalowych. Wynika stąd wniosek, że konstrukcje aluminiowe nie są alternatywą dla konstrukcji stalowych, lecz tylko istotnym ze względów estetycznych uzupełnieniem oferty konstrukcyjnej. Taki charakter mają realizacje hal aluminiowych o dużej rozpiętości przytaczane w literaturze specjalistycznej, np. centrum wystawowe w São Paulo (Brazylia), hala sportowa w Quito (Ekwador) i in. Są to konstrukcje zaprojektowane jako przekrycia strukturalne lub też jako jedno- bądź dwukrzywiznowe powłoki prętowe. Struktury prętowe uformowane w dekoracyjne kopuły lub piramidy są także stosowane w realizacjach obiektów o charakterze prestiżowym dla aglomeracji miejskich lub całego regionu. Taki charakter ma aluminiowa obudowa wieży kontrolnej na lotnisku w Barcelonie, pokazana na ryc. 2a, oraz kopuła geodezyjna muzeum w Rzymie, przedstawiona na ryc. 2b. Inne aluminiowe konstrukcje prętowe realizowane współcześnie to krato-ramy drogowe pod tablice informacyjne oraz wieże kratowe. Oddzielną ofertę stanowią konstrukcje powierzchniowe, takie jak wieże powłokowe, konstrukcje mostowe oraz zbiorniki na specjalne chemikalia,

których nie można magazynować w zbiornikach stalowych [5]. Wymienione powyżej konstrukcje aluminiowe mają charakter obiektów stacjonarnych o małym zapotrzebowaniu.



Ryc. 2. a) Wieża kontrolna na lotnisku w Barcelonie; b) Muzeum *Mercati Traianei* w Rzymie
Fig. 2. a) The control tower at Barcelona airport; b) Museum of *Mercati Traianei* in Rome

Dużo większy popyt inwestycyjny można prognozować na systemowe obudowy budynków szkieletowych oraz obiekty niestacjonarne, a w szczególności:

- lekkie, rozbieralne i wielofunkcyjne hale aluminiowe,
- przenośne mosty drogowe dla celów cywilnych i wojskowych,
- rozbieralne pomosty technologiczne.

3. Podstawowe założenia modelowe Eurocode 9

3.1. Elementy bezpieczeństwa konstrukcji aluminiowych

Częściowe współczynniki bezpieczeństwa metody stanów granicznych są zestawione w normach obciążeń i projektowania konstrukcji budowlanych i obejmują:

- współczynniki obciążenia γ_f ,
- współczynniki materiałowe γ_{Mi} (oznaczone wg norm krajowych PN symbolem γ_S lub wg eurokodów symbolami $\gamma_{M0}, \gamma_{M1}, \gamma_{M2}$),
- współczynnik konsekwencji zniszczenia γ_n .

W tabelicy 2 zestawiono wartości współczynników materiałowych dla konstrukcji stalowych – γ_S z normy krajowej PN-90/B-03200 oraz wartości współczynników γ_{Mi} , $i = 0,1,2$, wg Eurokodu 3 [6] dla konstrukcji stalowych i wg EC 9 dla konstrukcji aluminiowych. Jak wynika z danych zamieszczonych w tabl. 2, wartości liczbowe współczynników bezpieczeństwa γ_S oraz γ_{Mi} różnią się pomiędzy sobą. Jest to efekt odmiennego rozłożenia elementów bezpieczeństwa w metodzie stanów granicznych w normach polskich (γ_S – stosunek wartości średnich do wartości obliczeniowych) i eurokodach (γ_{Mi} – stosunek minimum hutniczych do wartości obliczeniowych). Jednocześnie dane zamieszczone w tabl. 2

wskazują, że w normach EC 3 i EC 9 przyjęto identyczne wartości współczynników materiałowych γ_{Mi} dla konstrukcji aluminiowych i stalowych (wartości w nawiasach dotyczą wytrzymałości doraźnej f_u).

Tablica 2

Wartości współczynników bezpieczeństwa γ_S, γ_{Mi}

Element konstrukcji	Norma		
	PN-90/B-03200	EC 3	EC 9
Przekrój	$\gamma_S = 1,33$	$\gamma_{M0} = 1,10 (1,25)$	$\gamma_{M0} = 1,10 (1,25)$
Pręt	$\gamma_S = 1,33$	$\gamma_{M1} = 1,10$	$\gamma_{M1} = 1,10$
Śruba lub sworzeń	$\gamma_S = 1,33-1,43$	$\gamma_{M2} = 1,25$	$\gamma_{M2} = 1,25$
Spoina	$\gamma_S = 1,33$	$\gamma_{M2} = 1,25$	$\gamma_{M2} = 1,25$

Poprawność takiego oszacowania dla konstrukcji aluminiowych została zweryfikowana w badaniach własnych autora, opisanych w pracy [5]. Z badań statystycznych przeprowadzonych dla stopu AlCu₄Mg₂ otrzymano dla blach wartość $\gamma_S = 1,204$ oraz dla kształtowników $\gamma_S = 1,322$. Powyższe statystyki odpowiadają cząstkowym współczynnikom materiałowym wg interpretacji eurokodu $\gamma_{M0} = 1,064$ dla blach oraz $\gamma_{M0} = 1,097$ dla kształtowników.

3.2. Wpływ penetracji termicznej na nośność elementów aluminiowych

Podstawowym wyrobem hutniczym na aluminiowe konstrukcje budowlane są blachy, a powszechnym sposobem łączenia blach jest ich spawanie. Jest to okoliczność istotna, ponieważ spawanie wiąże się z pełną penetracją termiczną materiału i w konsekwencji może prowadzić do zmiany własności mechanicznych w strefach wpływu ciepła, w skrócie HAZ (ang. *heat-affected zones*). Liczbowo efekt HAZ można ująć, definiując współczynnik redukcyjny $\rho_{\text{haz}} \leq 1$. Możliwe są dwa podejścia – redukuje się wytrzymałość doraźną $A(f_u \rho_{\text{haz}})$, pozostawiając nominalne wymiary przekroju, lub alternatywnie redukuje się charakterystyki geometryczne, pozostawiając nie zmienioną granicę wytrzymałości rozdzielczej $f_u(A \rho_{\text{haz}})$. Dla wszystkich stopów aluminium w stanach surowym F lub wyżarzonym O współczynnik wpływu ciepła $\rho_{\text{haz}} = 1$. Wartości współczynnika ρ_{haz} w innych stanach przerobienia stopu przyjmują wg EC 9 [2] wartość $\rho_{\text{haz}} = 0,50-0,86$.

3.3. Wytrzymałość charakterystyczna i obliczeniowa stopów aluminium

Rozróżnia się następujące wytrzymałości charakterystyczne (minima hutnicze f_o lub f_u) i obliczeniowe przekrojów aluminiowych w stanie nośności granicznej:

- wytrzymałość charakterystyczną $f_o = f_{o2}$ i obliczeniową $f_{do} = f_o / \gamma_{M1}$ przekrojów zginanych, ściskanych lub rozciąganych na granicy plastyczności umownej materiału rodzimego,
- wytrzymałość charakterystyczną $f_a = f_u$ i obliczeniową $f_{da} = f_a / \gamma_{M2}$ przekrojów zginanych, ściskanych lub rozciąganych na granicy wytrzymałości rozdzielczej przekroju lokalnie osłabionego,
- wytrzymałość charakterystyczną $f_v = f_{o2} / \sqrt{3}$ i obliczeniową $f_{dv} = f_v / \gamma_{M1}$ przy ścinaniu na granicy plastyczności umownej materiału rodzimego.

Konsekwencją powyższych definicji jest konieczność dwukrotnego sprawdzania warunków nośności przekrojów aluminiowych: raz na granicy plastyczności umownej i ponownie na granicy wytrzymałości rozdzielczej przekroju osłabionego otworami na śruby lub destrukcją termiczną w strefach wpływu ciepła HAZ. Są to efekty specyficzne dla stopów aluminium, które nie są aktualne dla stali konstrukcyjnych.

3.4. Klasyfikacja przekrojów aluminiowych

Normalizacja obliczeń konstrukcji aluminiowych w rekomendacjach europejskich EC 9 wprowadza w sposób konsekwentny rozwiązania teorii nośności granicznej. Wyrazem takiego podejścia jest klasyfikacja przekrojów aluminiowych wzorowana w pełni na klasyfikacji przyjętej w EC 3 dla przekrojów stalowych.

4. Podsumowanie

Badania teoretyczne i doświadczalne konstrukcji budowlanych w ostatnim 30-leciu były w zaawansowanych gospodarczo krajach prowadzone kompleksowo. Zostały wypracowane nowe rozwiązania także w konstrukcjach aluminiowych. Dokonał się postęp o charakterze jakościowym w metodach obliczania tych konstrukcji. Środowisko konstruktorów i architektów w Polsce, na skutek decyzji administracyjnych z lat siedemdziesiątych zakazujących stosowania stopów aluminium na konstrukcje budowlane, było od tych badań izolowane. Zastój dotknął także krajowe ośrodki naukowe, które zajmowały się problematyką konstrukcji aluminiowych marginalnie. Szanse na wyrównanie powstałej luki w przygotowaniu zawodowym konstruktorów i architektów stwarza Eurocode 9, który pod względem merytorycznym jest dokumentem nowoczesnym, a pod względem aplikacyjnym jest dokumentem kompletnym, w pełni zharmonizowanym z innymi eurokodami.

Literatura

- [1] Mazzalani F.M., *Aluminium alloy structures*. Pitman Advanced Publishing Program. Boston, London, Melbourne 1985 (second edition London 1994).
- [2] Eurocode 9: *Design of aluminium structures*. Part 1-1: *General rules and rules for buildings*. Part 1-5 *Shell structures*. ENV 1999-1-1, ENV 1999-1-5.
- [3] BS 8118: *Structural use of aluminium. Code of practice for design*. BSI, 1991.
- [4] ISO/TC 167/SC 3: *Aluminium structures material and design*. Part 1: *Ultimate Limit State – Static Loading*, No 188, 1992.
- [5] Gwóźdź M., *Stany graniczne konstrukcji aluminiowych*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2007.
- [6] Eurokod 3: *Projektowanie konstrukcji stalowych*. Część 1-1: *Reguły ogólne i reguły dla budynków*, PN-EN 1993-1-1:2005; IDT.