ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2005
Seria: BUDOWNICTWO z. 104 Nr kol. 1695

Rafał GREC*
Politechnika Krakowska

MATERIAŁOWE WSPÓŁCZYNNIKI BEZPIECZEŃSTWA WYBRANYCH STOPÓW ALUMINIUM

Streszczenie. W referacie przedstawiono najistotniejsze czynniki, które projektant uwzględnia przy sprawdzaniu SGN projektowanego obiektu. Zweryfikowano wartości współczynników materiałowych, zawartych w normie do projektowania konstrukcji aluminiowych EC-9, na podstawie badań własnych i na podstawie dostępnej literatury. Statystycznie opracowane współczynniki uwzględniają również rzeczywistą grubość elementów aluminiowych.

MATERIAL FACTORS OF SAFETY SELECTED ALUMINIUM ALLOYS

Summary. In the article there are presented most significant factors that the designer has to take into account verifying ULS of a designing structure. Values of material factors, presented in design standard EC-9, were verified with the own research and the one of other authors. Statistics of measured thickness of aluminium elements were also included in material factor study.

1. Wstęp

Bezpieczeństwo konstrukcji jest analizowane już na etapie projektowania obiektu. Klasyczne formacje obliczeń półprobabilistycznych określa miary bezpieczeństwa za pomocą częściowych współczynników bezpieczeństwa.

W tej metodzie stosuje się częściowe współczynniki bezpieczeństwa γ_i określone jako stosunek obciążenia obliczeniowego x_{id} do obciążenia charakterystycznego x_{ik} „ lub jako stosunek wytrzymałości charakterystycznej x_{ik} do wytrzymałości obliczeniowej x_{id} [8]:

$$\gamma_i = x_{id} / x_{ik} \geq 1 \quad (1) \qquad \text{lub} \qquad \gamma_i = x_{ik} / x_{id} > 1, \qquad i = 1, 2 \ldots n \quad (1a)$$

* Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Marian Gwóźdź, prof. nzw. Politechniki Krakowskiej

gdzie we wzorze (1): x_{ik} – obciążenie obliczeniowe, x_{id} – obciążenie charakterystyczne, a wzorze (1a): x_{ik} – wytrzymałość charakterystyczna, x_{id} – wytrzymałość obliczeniowa.

Częściowe współczynniki bezpieczeństwa należy interpretować probabilistycznie, w przypadku rozkładu normalnego na podstawie wzoru (2). W przypadku rozkładu logarytmicznie normalnego na podstawie wzoru (2a).

$$\gamma_i = (1 \pm \beta_i v_i) \quad (2) \qquad \text{lub} \qquad \gamma_i = \exp(\pm \beta_i v_i) \quad (2a)$$

gdzie: v_i, v_i – współczynniki zmienności obciążeń i wytrzymałości (normalny lub logarytmiczno-normalny), β_i – częściowy wskaźnik bezpieczeństwa.

W normalizacji zachodnioeuropejskiej i amerykańskiej rekomendowana wartość wskaźnika wynosi $\beta_i = 2$, a w normalizacji środkowoeuropejskiej przyjęto $\beta_i = 3$. Współczynniki częściowe obowiązujące dla obiektów budowlanych o przeciętnych wymaganiach bezpieczeństwa są zestawione w krajowych normach obciążeń i projektowania konstrukcji budowlanych i obejmują co najmniej trzy grupy tych współczynników:

- współczynniki obciążenia γ_f,
- współczynniki materiałowe γ_R,
- współczynniki warunków pracy: wyboczenia słupów φ, zwichrzenia belek φ_L, stateczności miejscowej ścianek φ_p [8].

W normalizacji krajowej [4] system współczynników stanu granicznego wytrzymałości konstrukcji aluminiowych nie jest dostatecznie rozpoznany.

Dla oceny powyższych współczynników dokonano analizy porównawczej miar bezpieczeństwa wg różnych norm projektowania i obciążeń. Ponadto, przeprowadzono własne badanie statystyczne w celu zweryfikowania ustaleń normowych współczynników materiałowych.

2. Współczynniki częściowe stanów granicznych konstrukcji aluminiowych

W tablicy 1 [8] zestawiono niektóre współczynniki obciążenia wg norm polskich i wszystkie przypadki wg EC-1. W tablicy 2 [8] zestawiono wartości współczynników materiałowych γ_R dla konstrukcji stalowych wg PN-90/B-03200 i EC-3 i dla konstrukcji aluminiowych wg EC-9.

Współczynniki częściowe zamieszczone w tablicach 1 i 2 różnią się między sobą, co wynika z faktu różnego rozłożenia elementów bezpieczeństwa w metodzie stanów

granicznych. Jednocześnie należy podkreślić, że w dokumentach EC-3 i EC-9 przyjęto takie same współczynniki bezpieczeństwa dla konstrukcji stalowych i aluminiowych.

Tablica 1

Współczynniki obciążenia wg PN i EC

Rodzaj obciążenia		Współczynnik γ_f	
		PN	EC-1
stałe	konstrukcje żelbetowe, metalowe	1.1	1.35
	betony lekkie, wylewki wykonywane fabrycznie	1.2	
	jw. lecz wykonywane na budowie	1.3	
zmienne technologiczne	ciężar własny urządzeń sanitarnych	1.2	1.50
	ciężar materiałów wypełniających urządzenia	1.05-1.2	
	obciążenie równomiernie rozłożone	1.2-1.4	
zmienne klimatyczne	wiatr	1.3	
	śnieg	1.4	

Tablica 2

Współczynniki materiałowe wg PN, EC-3 i EC-9

Nośność obliczeniowa	Współczynnik γ_f		
	PN-90/B03200	EC-3	EC-9
przekroju lub pręta	1.33	1.10	1.10
śrub i przekrojów osłabionych	1.33-1.43	1.25	1.25
przekrojów spawanych	-	1.25	1.25

Na podstawie badań, przeprowadzonych na dwóch próbach statystycznych, zweryfikowano statystycznie współczynniki materiałowe wg wzoru (2), czyli oszacowano współczynniki zmienności v_{02} - dla umownej granicy plastyczności, v_u - dla granicy wytrzymałości i v_E - dla modułu sprężystości. Pierwszą próbę zestawiono na podstawie zgromadzonych atestów hutniczych producentów krajowych z lat 1988÷1990 dla stopu AlCu4Mg2 [10]. Jest to próba o liczebności n = 1295 realizacji, co pozwala na wiarygodne oszacowanie współczynników niejednorodności γ_{ni} dla umownej granicy plastyczności f_{02} i wytrzymałości doraźnej f_u. Drugą próbę zestawiono na podstawie własnych badań laboratoryjnych, zrealizowanych w latach 2003÷2004 dla stopów AlMg4,5Mn0,7; AlMg3; AlMgSi oraz AlSi1MgMn. Elektroniczna rejestracja wyników statycznej próby rozciągania, przeprowadzonej na 116 próbkach laboratoryjnych, umożliwiła oszacowanie współczynnika niejednorodności γ_E modułu sprężystości podłużnej E. Badania własności mechanicznych uzupełniono pomiarami odchyłek geometrycznych wyrobów aluminiowych od wymiarów nominalnych.

Statystyczne opracowanie atestów hutniczych przeprowadzono w zapisie logarytmicznie-normalnym, a otrzymane wyniki zebrano w tablicy 3. W kolumnach 4 i 6 zestawiono obliczone wartości centralne (mediany) wytrzymałości f_{02} i f_u, w kolumnach 5 i 7 współczynniki zmienności, a w kolumnach 8 i 9 współczynniki niejednorodności umownej

granicy plastyczności γ_{s02} i wytrzymałości doraźnej γ_{su}, obliczone za pomocą wzoru (2) dla $\beta = 3$.

Otrzymane współczynniki zmienności v_{02} = 0.062÷0.098 są zbliżone do wartości uzyskanych w badaniach statystycznych dla próby reprezentatywnej stali konstrukcyjnej [11]. Analogicznie jak dla wyrobów stalowych należy oszacować wpływ tolerancji wymiarowych, zwłaszcza odchyłek grubości od wymiarów nominalnych, który ujmuje wytrzymałość konwencjonalną, opisaną następującymi wzorami:

$$f_o = cf_{02}\,; \qquad f_a = cf_u \tag{3}$$

gdzie $c = t/t_{nom}$ jest to stosunek grubości rzeczywistej do nominalnej.

Ze wzorów (3) wynikają następujące zmodyfikowane formuły współczynnika niejednorodności materiału:

$$\gamma^*_{si} = exp\left(\beta_i \sqrt{v_i^2 + v_t^2}\right) \tag{4}$$

Tablica 3

Parametry rozkładu umownej granicy plastyczności f_{02} i wytrzymałości doraźnej f_u dla stopu AlCu4Mg2 według badań własnych [10]

Grupa	Grubość t [mm]	Liczebność n	$\bar{f}_{02}$ [MPa]	v_{02}	$\bar{f}_u$ [MPa]	v_u	γ_{s02}	γ_{su}
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Blachy	2÷10	272	308	0.059	441	0.022	1.194	1.068
	12÷25	122	335	0.042	444	0.033	1.134	1.104
	26÷40	102	335	0.037	425	0.048	1.117	1.155
	41÷70	132	328	0.044	400	0.047	1.141	1.151
	2÷80	628	322	**0.062**	428	0.056	**1.204**	1.183
Kształtowniki	2÷20	272	378	**0.093**	500	0.083	**1.322**	1.283
Pręty	do 30	92	373	**0.098**	512	0.087	**1.342**	1.298
	> 30	303	383	0.087	524	0.073	1.298	1.245

W tablicy 4 zestawiono statystyczne parametry bezwymiarowych odchyłek geometrycznych $c = t/t_{nom}$ wyrobów aluminiowych, w rozbiciu na grupy asortymentowe. Dla zbioru łącznego o liczebności n = 134 realizacje, mediana $\bar{c}$ i współczynnik zmienności $v_c = v_t$ wynoszą odpowiednio: c – LN($\bar{c}$ = 1.001; v_t = 0.016). Na podstawie danych statystycznych zestawionych w tablicy 3 oraz v_t = 1,6%, ze wzoru (4) obliczono zmodyfikowane współczynniki niejednorodności dla wybranych wyrobów aluminiowych (por. tablica 3 pozycje wytłuszczone):

- dla blach γ^*_{s02} = 1.212,
- dla kształtowników γ^*_{s02} = 1.327,
- dla prętów γ^*_{s02} = 1.347.

Pomierzone grubości wyrobów aluminiowych są większe niż minimalne grubości ujęte w normie [6] i bardzo często przekraczają maksymalne grubości równe sumie grubości nominalnej t_{nom} i dopuszczalnej odchyłki Δ. Maksymalna pomierzona odchyłka od t_{nom} wynosi 4.5 % dla blach w zakresie 3.5÷50 mm. Średnia pomierzona grubość równa się 1.001 t_{nom} dla blach, 1.001 t_{nom} dla kształtowników i 1.000 t_{nom} dla płaskowników.

Tablica 4

Parametry rozkładu odchyłek wymiarowych c wyrobów aluminiowych.

Grupa asortymentowa	Grubość t [mm]	Liczebność n	$\bar{c}$	v_t	Stop
1	2	3	4	5	6
Blachy	3÷30	45	1.001	0.014	AlMg2, AlMg3
Kształtowniki	3÷10	12	1.001	0.010	AlMgSo
Płaskowniki	5÷40	77	1.000	0.019	AlCu4Mg1

Wyniki własnych badań laboratoryjnych, otrzymane w statycznych próbach rozciągania dla stopów AlMg4,5Mn0,7; AlMg3; AlMgSi oraz AlSi1MgMn, zestawiono w tablicy 5. Do badań wybrano stopy, dla których zależności naprężenie-odkształcenie określają górną i dolną granicę pęku krzywych σ–ε. Badania laboratoryjne przeprowadzono na próbach jednorodnych statystycznie, dla pojedynczej partii zamówionych blach. Jednorodność materiału potwierdzają współczynniki zmienności wytrzymałości f_{02} i f_u, o wartościach v_i = 1.0÷3.2 %. Równocześnie nie zaskakują współczynniki zmienności v_E = 1.9÷4.2 %, co wskazuje na niejednorodność modułu sprężystości podłużnej E badanych partii blach. Taki wynik oznacza, że przyjmowana powszechnie w obliczeniach inżynierskich stała wartość modułu sprężystości podłużnej E_o = 70 GPa jest uproszczeniem. Przyjmując E_o = const, warunki stanu granicznego nośności prętów aluminiowych należy formułować w trójwymiarowej przestrzeni stanów, z uwzględnieniem losowego błędu obliczeń:

$$c_E = \frac{E}{E_o} \tag{5}$$

Wzór (5) umożliwia połączenie wyników pomiarów modułu sprężystości E wszystkich czterech prób z tablicy 5 w jeden zbiór zmiennych losowych bezwymiarowych o liczebności n = 82 realizacje (z wyłączeniem próbek wyciętych podłużnie), dla których obliczono medianę $\bar{c}_E$ = 0.953 oraz współczynnik zmienności v_E = 0.049. Przyjmując wskaźnik bezpieczeństwa β = 3, otrzymujemy statystycznie uzasadniony współczynnik niejednorodności γ_E, obliczeniową wartość modułu Younga i smukłość względną pręta $\bar{\lambda}$:

$$\gamma_E = \exp\left(3x\sqrt{0.049^2 + 0.016^2}\right) = 1.167$$

$$E = \bar{c}_E E_o/\gamma_E = 0.957xE_o/1.167 = E_o/1.22 \text{ GPa} \tag{6}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{Ro}}{N_{cr}/1.22}} = 1.11\sqrt{\frac{N_{Ro}}{N_{cr}}}$$

gdzie N_{cr} – siła krytyczna charakterystyczna wg klasycznej teorii stateczności przy wyboczeniu giętnym,

$N_{Ro} = Af_o$ – nośność obliczeniowa przekroju ściskanego.

W tablicy 5 oznaczono parametry statystyczne badanych cech: f_{02}, f_u, E, A, a_{50} w założeniu rozkładu normalnego: $\bar{f}_i$ – wartość średnia, σ_i – odchylenie standardowe, v_i – współczynnik zmienności. Ponadto, $min\ f_i$ oznacza odpowiednie minimum hutnicze, a m – wykładnik potęgowy w formule Ramberga-Osgooda.

Tablica 5

Parametry statystyczne próby laboratoryjnej stopów Al.

Parametr	f_{02} [MPa]	f_u [MPa]	E [GPa]	A [cm²]	a_{50} [%]	m
stop AW-5083 w stanie H22 – próbek 30						
Próbki wycięte poprzecznie – szt.19						
$\bar{f}_i$	145.6	291.2	66.7	0.51	21.0	15.4
σ_i	1.23	4.31	2.26	-	-	-
v_i	0.008	0.015	0.034	-	-	-
Próbki wycięte podłużnie – szt.11						
$\bar{f}_i$	176.8	307.4	71.4	0.50	21.0	14.3
σ_i	3.15	3.81	-	-	-	-
v_i	0.018	0.012	-	-	-	-
$min\ f_i$	125.0	275.0	70.0	-	11.0	-
stop AW-5754 w stanie H112 – próbek 28						
$\bar{f}_i$	162.3	231.9	69.0	0.73	16.4	16.2
σ_i	1.91	1.93	2.35	-	-	-
v_i	0.012	0.008	0.034	-	-	-
$min\ f_i$	140.0	210.0	70	-	12.0	-
stop AW-6060 w stanie T6 – próbek 30						
$\bar{f}_i$	187.0	215.0	63.9	0.63	9.5	20.2
σ_i	4.27	6.99	2.70	-	-	-
v_i	0.023	0.033	0.042	-	-	-
$min\ f_i$	140.0	170.0	70	-	8.0	-
stop AW-6082 w stanie T651 – próbek 28						
$\bar{f}_i$	301.6	315.7	69.6	0.51	12.4	52.6
σ_i	3.99	5.40	1.31	-	-	-
v_i	0.013	0.017	0.019	-	-	-
$min\ f_i$	255.0	300.0	70	-	9.0	-

3. Podsumowanie

Bezpieczeństwo konstrukcji aluminiowych szacuje się na podstawie systemu współczynników materiałowych i obciążeniowych. Badania statystyczne stopów uzasadniają jednolitą dla konstrukcji stalowych i aluminiowych wartość współczynnika materiałowego związanego z nośnością przekroju $\gamma_m = \gamma_{s02} \approx \gamma_{su}$ = 1,33, por. tablica 3. Przeprowadzone własne badania wytrzymałościowe wybranych stopów aluminium o średniej liczebności wykazały jednak niejednorodność modułu sprężystości E. Z opracowania statystycznego wyników powyższych badań wynika współczynnik niejednorodności związany z wyboczeniem sprężystym prętów aluminiowych $\gamma_m = \gamma_E$ = 1,22. Jest celowe kontynuowanie badań statystycznych w zakresie modułu sprężystości stopów aluminium, ponieważ dla dużej próby można oczekiwać większej niejednorodności materiału, a w konsekwencji wyższych wartości współczynnika materiałowego związanego z nośnością prętów.

Powyższy efekt jest łagodzony nieco niższym rozrzutem odchyłek wymiarowych wyrobów aluminiowych w porównania z wyrobami stalowymi. Przeprowadzone pomiary grubości wyrobów aluminiowych wykazały, że ich tolerancje wymiarowe są mniejsze szacunkowo o około 50%.

LITERATURA

1. British Standard Institute "BS-8118, Structural use of aluminium: part 1. Code of practice and design", 1991.
2. ENV 1999-1-1:1998, Eurocode 9: Design of aluminium structures -Part 1-1 General rules and rules for buildings.
3. ENV 1993-1/2., Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings.
4. PN-64/B-03220 Konstrukcje aluminiowe. Obliczenia statyczne i projektowanie.
5. PN-EN 485-2:2004 Aluminium i stopy aluminium. Blachy, taśmy i płyty. Część 2: Własności mechaniczne.
6. PN-EN 485-4:1997 Aluminium i stopy aluminium. Blachy, taśmy i płyty. Tolerancje kształtu i wymiarów walcowanych na zimno.

7. Gwóźdź M.: Statystyki wytrzymałościowe stopów aluminium, XLV Konferencja Naukowa Kom. Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, Krynica 1999.
8. Gwóźdź M.: Bezpieczeństwo konstrukcji aluminiowych projektowanych metodą stanów granicznych, Sympozjum. Projektowanie Koncepcyjne – Kształtowanie Konstrukcji. Konstrukcje z Blach Fałdowych. Konstrukcje Cięgnowe, Rzeszów 2000.
9. Gwóźdź M.: Elastic-plastic load carrying capacity of axially compressed aluminium struts, Archives of Civil Engineering, XLIV 4, 1998.
10. Gwóźdź M.: Statystyki wytrzymałości stopów aluminium. XLV Konf. Nauk. KILiW PAN i KN PZITB. Wrocław-Krynica 1999.
11. Sowa A.: Statystyka wytrzymałości stali a bezpieczeństwo konstrukcji. Budownictwo Lądowe. z. 59. Politechnika Krakowska, Zeszyt Naukowy nr 2. Kraków1980.

Recenzent : Prof. dr hab. inż. Zbigniew Kowal