

Rafał GREC\*

Politechnika Krakowska

## NOŚNOŚĆ PRĘTÓW ALUMINIOWYCH OSIOWO ŚCISKANYCH

**Streszczenie.** Referat przedstawia analizę nośności prętów aluminiowych. Autor skupił się na wpływie właściwości mechanicznych stopów aluminium na nośność prętów ściskanych. Właściwości mechaniczne zweryfikowano statystycznie na podstawie badań eksperymentalnych. Rzeczywiste zależności odkształcenie-przemieszczenie pozwoliły na statystyczne oszacowanie m.in. modułu Younga i umownej granicy plastyczności. Stwierdzono, że wartości modułu Younga, wyznaczone wg badań, są zróżnicowane. W referacie przedstawiono wyniki analizy nośności prętów ściskanych przy uwzględnieniu rzeczywistej ścieżki materiałowej, co pozwala na opisanie wpływu tych ścieżek na nośność prętów. Wykorzystano znane modele materiałowe. Analiza numeryczna została wykonana w programie Ansys.

## CAPACITY OF AXIALLY LOADED ALUMINIUM ALLOY MEMBERS

**Summary.** The article presents analysis of capacity of axially loaded aluminium alloy members. The author focused on influence of mechanical properties verified in experimental tests. Real stress-strain relations allowed to estimate statistically Young's modulus and proof strength. It was noticed that Young's modulus according to tests is diverse. In the paper the author carried out theoretical and numerical analyses of capacity of axially loaded members taking into consideration real stress-strain curves. Curves allow to describe their influence on member capacities. The numerical analysis was made with the program Ansys.

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

## 1. Wstęp

Aluminium jest obecnie szeroko stosowanym materiałem w budownictwie, ale nie występuje w czystej postaci tylko w postaci stopów. Odpowiednia ilość pierwiastków stopowych oraz końcowa obróbka zmienia właściwości otrzymanego materiału. W normie EC-9 podzielono stopy na ulepszone cieplne (Heat Treated –HT) i nieulepszone cieplne (Non-Heat Treated-NHT). Z każdej grupy stopów wybrano po dwa stopy, których ścieżki zależności  $\sigma - \varepsilon$ , wg wstępnych oszacowań nieliniowości materiałowej, były skrajnymi krzywymi w danej grupie stopów. Wybrano do badań stopy NHT AW-5083, AW-5457 oraz HT AW-6060 i AW-6082.

## 2. Nieliniowość materiałowa

Nieliniowość materiałową, wyrażoną jako zależności  $\sigma - \varepsilon$  dla badanych stopów, przedstawiono na rys. 1. Oś pionowa została unormowana jako iloraz naprężenia i umownej granicy plastyczności  $f_{02}$ , a na osi poziomej pokazano odkształcenia w zakresie do 6%. Kształt krzywych jest różny dla badanych stopów, co oznacza, że wzmocnienie materiału jest większe dla stopów NHT niż dla stopów HT (rys. 1). W analizie teoretycznej wykorzystano model materiału opisany wzorem Ramberga-Osgooda, którego parametry wyznaczono na podstawie badań (tab. 1).

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \varepsilon_{02} \cdot \left( \frac{\sigma}{f_{02}} \right)^m \quad (1)$$

gdzie:

$f_{02}$  – umowna granica plastyczności,

$E$  – moduł sprężystości,

$\varepsilon_{02}$  – odkształcenie trwałe równe 0,2%,

$m$  – parametr wzmocnienia.

Badania własne właściwości stopów wykazały rozrzut wartości modułu sprężystości, który należy potraktować jako zmienną losową. W zakresie poza liniową sprężystością moduł styczny i moduł sieczny należy również potraktować jako zmienną losową. Wartość średnia i współczynnik zmienności dla modułu sprężystości badanych stopów zestawiono w tabeli 1.

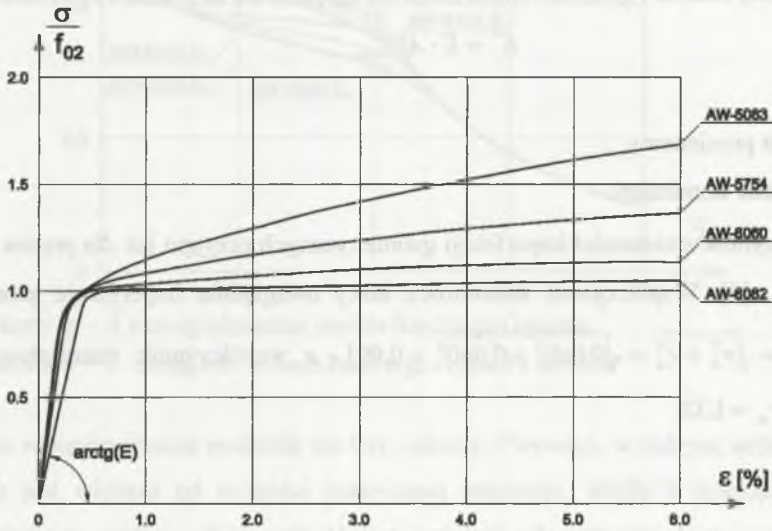
Miara rozrzutu  $\nu_E$  pozwala oszacować statystyczny współczynnik materiałowy modułu sprężystości:

$$\gamma_E = \exp(\beta \cdot \nu_E) \quad (2)$$

gdzie:

$\beta$  – wskaźnik niezawodności,

$\nu_E$  – współczynnik zmienności.



Rys. 1. Wykresy  $\sigma - \varepsilon$  na podstawie badań

Fig. 1. Relations  $\sigma - \varepsilon$  according to tests

Tabela 1

stop	AW-5083	AW-5754	AW-6060	AW-6082	cały zakres
ilość prób	20	18	30	18	86
$f_{02}$ [MPa]	145.6	162.3	184.3	301.6	-
$m$	15.2	16.2	25.0	52.6	-
$\bar{E}$ [GPa]	67.6	69.0	63.9	69.6	66.9
$\nu_E$	0.045	0.034	0.042	0.019	0.052
$\gamma_E$	1.14	1.11	1.13	1.06	1.17

Współczynnik materiałowy obliczony wg wzoru (2) dla przyjętej wartości  $\beta = 3$  zamieszczono w tablicy 1. W rekomendacjach EC-9 [1] przyjęto stałą wartość modułu sprężystości  $E = 70 \text{ GPa}$ . Zdefiniowano bezwymiarowy moduł sprężystości  $E' = E/70 \text{ GPa}$

dla tej zmiennej i dla całego zakresu, obliczono wartość centralną  $\bar{E}' = 0,956$ , współczynnik zmienności  $\nu_{E'} = 0,069$  oraz współczynnik materiałowy wg (2)  $\gamma_{E'} = 1,23$ .

### 3. Imperfekcje geometryczne

Zmiennymi losowymi, które mają wpływ na nośność pręta ściskanego, są imperfekcje geometryczne, lokalne i globalne. Imperfekcje uwzględnia się na podstawie wyników badań:

$$E^* = E \cdot A / A_{nom} \quad (3)$$

gdzie:

$A$  – wymiar pomierzony,

$A_{nom}$  – wymiar nominalny.

Współczynnik zmienności imperfekcji geometrycznych przyjęto jak dla prętów stalowych  $\nu_A = 0,060$ , [6]. Współczynnik zmienności, który uwzględnia imperfekcje geometryczne, wynosi  $\nu = \sqrt{\nu_E^2 + \nu_A^2} = \sqrt{0,069^2 + 0,060^2} = 0,091$ , a współczynnik materiałowy wg (2) równa się  $\gamma_m = 1,32$ .

### 4. Analiza teoretyczna nośności prętów ściskanych

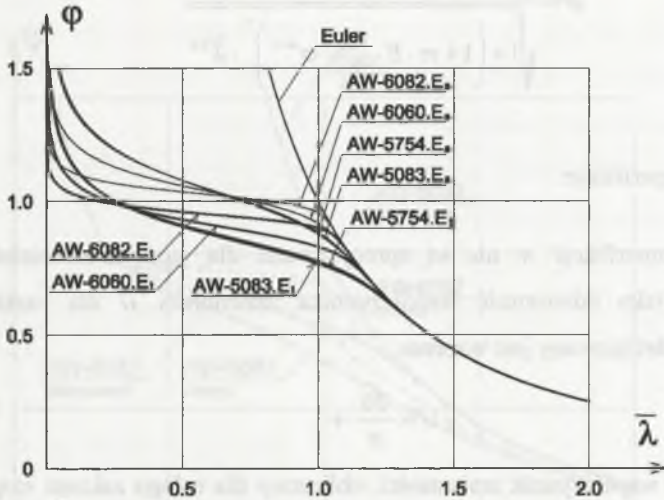
Krzywe nośności prętów aluminiowych można wyprowadzić na podstawie analiz deterministycznej, półprobabilistycznej i probabilistycznej. Przyjęty model deterministyczny opisuje teoria Engessera, formułę półprobabilistyczną przedstawił Murzewski [6], a rozwiązanie probabilistyczne Gwoździ [4].

Bezwymiarowa nośność opisana teorią Engessera uwzględnia moduł styczny  $E_t$ . Bezwymiarowa nośność uwzględniająca model materiału Ramberga-Osgooda (1) ma postać:

$$\varphi = \frac{1}{1 + m \cdot E \cdot \frac{\varepsilon_{02}}{f_{02}} \cdot \varphi^{m-1}} \cdot \frac{1}{\lambda^2} \quad (4)$$

Wzór (4) zmodyfikowano i zastąpiono moduł styczny modułem siecznym  $E_s$ . Na rys. 2 pokazano wykresy nośności dla modułów stycznego i siecznego. Z rysunku wynika, że nośność prętów ściskanych przy uwzględnieniu modułu siecznego jest większa niż nośność

z uwzględnieniem modułu stycznego i zależy od parametru wzmocnienia  $m$ . Doświadczenia, np. Mazzolaniego [5], pokazują, że uwzględnienie modułu stycznego w nośności prętów ściskanych dobrze opisuje rzeczywiste zachowanie się prętów.



Rys. 2. Wykresy  $\varphi - \bar{\lambda}$  z uwzględnieniem modelu Ramberga-Osgooda

Fig. 2. Relations  $\varphi - \bar{\lambda}$  taking into account Ramberga-Osgood's formula

Krzywe nośności można podzielić na trzy zakresy. Pierwszy, w którym nośność prętów ściskanych jest większa od nośności plastycznej przekroju, wtedy o nośności decyduje przekrój elementu. Drugi, gdzie nośność jest mniejsza od nośności plastycznej przekroju i zależy od nośności przekroju oraz od nośności Eulera. Wpływ nośności krytycznej wzrasta tu wraz ze wzrostem smukłości elementów. Trzeci, w którym nośność prętów ściskanych równa się nośności na ściskanie wg teorii Eulera. W pierwszych dwóch przedziałach nieliniowość fizyczna  $\sigma - \varepsilon$  wpływa na nośność prętów oraz na granice przedziałów, natomiast w trzecim przedziale naprężenia nie przekraczają liniowej granicy sprężystości. W drugim zakresie, w miarę wzrostu obciążenia, wpływ nieliniowości na stopy NHT zaczyna się wcześniej niż dla stopów HT i wpływa to na szybszy przyrost odkształceń plastycznych oraz deformację elementu ściskanego. Wzrost deformacji zwiększa moment zginający w środku rozpiętości, który powoduje wzrost odkształceń. Wynika z tego wniosek, że przyrosty deformacji i odkształceń są zależne od siebie. Większy wpływ jest widoczny dla stopów NHT, co jest związane z mniejszym zakresem liniowej sprężystości.

W praktyce nie uwzględnia się wzmocnienia materiału i maksymalna nośność równa się nośności plastycznej. Jedną z propozycji podał Murzewski, [6]. Wzór Murzewskiego z uwzględnieniem nieliniowości fizycznej wg Ramberga-Osgooda (2) ma postać:

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt[n]{1 + \left(1 + m \cdot E \cdot \frac{\varepsilon_{02}}{f_{02}} \cdot \varphi^{m-1}\right)^n \cdot \bar{\lambda}^{2n}}} \quad (5)$$

gdzie:

$n$  – parametr imperfekcje.

Parametry imperfekcji  $n$  nie są sprecyzowane dla stopów aluminium. Murzewski interpretuje  $n$  jako odwrotność współczynnika zmienności  $\nu$  dla rozkładu Weibulla. Współczynnik zdefiniowany jest wzorem:

$$\nu = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot \nu \quad (6)$$

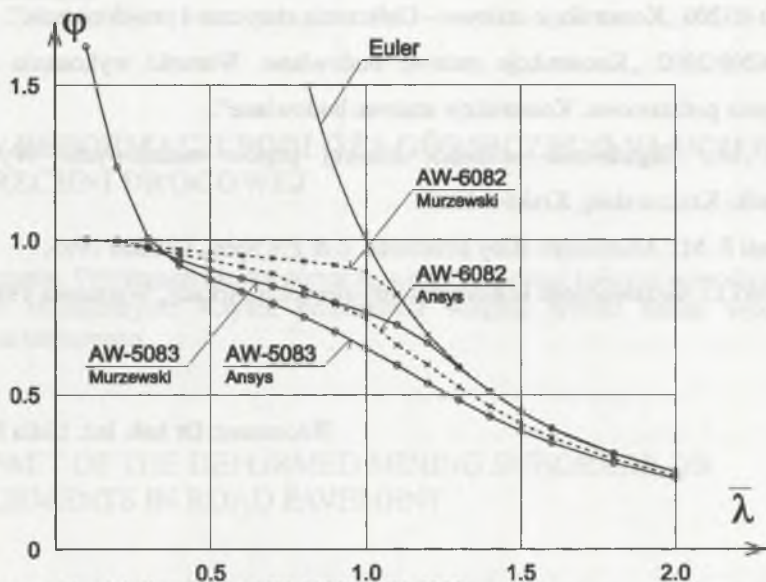
Statystyczny współczynnik zmienności, obliczony dla całego zakresu stopów, równa się  $\nu = 5,5\%$ , stąd wartość  $n = 18,3$ . Wykresy krzywych wg wzoru (5) pokazano na rys. 3.

## 5. Analiza numeryczna

W prętach rzeczywistych nośność uzależniona jest od nieliniowości materiałowej, imperfekcji geometrycznych i imperfekcji mechanicznych. Wszystkie parametry, które wpływają na nośność prętów ściskanych, wyznacza się doświadczalnie. Symulacje komputerowe oparte na metodzie elementów skończonych uwzględniają wszystkie parametry decydujące o nośności. Autor przeprowadził symulację w programie Ansys na podstawie wyznaczonych danych z badań doświadczalnych.

Symulację komputerową wykonano dla pręta przegubowo podpartego na obu końcach, ściskanego siłą osiową. Pręt był rurą kwadratową o szerokości boku 150 mm i grubości ścianek 10 mm. Pręt zamodelowano elementami powłokowymi shell 181, nadano mu wstępne wygięcie w postaci półfali sinusoidy o wartości  $\nu_0 = 0,001$  i uwzględniono dane materiałowe wg badań własnych. Na rys. 3 pokazano nośność prętów wykonanych ze stopów, których nieliniowość materiałowa jest oszacowaniem górnym i dolnym (rys. 1).

Z rys. 3 wynika, że nośności wyznaczone numerycznie są mniejsze od nośności wg wzoru (5) z parametrami z tabelicy 1. Jest to wynik uwzględnienia rzeczywistej nieliniowości materiałowej stopów, który dla małych smukłości pokazuje efekt wzmocnienia materiału.



Rys. 3. Krzywe nośności dla stopów AW-5083 i AW-6082

Fig. 3. Curves of capacity for alloys AW-5083 and AW-6082

## 6. Wnioski

1. Przyjęcie stałego modułu sprężystości  $E = 70 \text{ GPa}$  nie odzwierciedla rzeczywistych wartości tego parametru dla badanych stopów. Należy uwzględnić rozrzut modułu sprężystości przy sprawdzaniu nośności pręta.
2. Podział stopów na HT i NHT jest uzasadniony ze względu na nieliniowość fizykalną.
3. Kształt krzywych  $\sigma - \varepsilon$  istotnie wpływa na nośność prętów ściskanych. Decydują o tym: granica proporcjonalności oraz wzmocnienie materiału.

**LITERATURA**

1. ENV 1999-1-1 „Eurocode 9: Design of aluminium structures. General rules and rules for building”.
2. PN-90/B-03200 „Konstrukcje stalowe – Obliczenia statyczne i projektowanie”.
3. PN-B-06200:2002 „Konstrukcje stalowe budowlane. Warunki wykonania i odbioru. Wymagania podstawowe. Konstrukcje stalowe budowlane”.
4. Gwóźdź M.: Zagadnienia nośności losowej prętów metalowych. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 1997.
5. Mazzolani F. M.: Aluminium alloy structures. E & FN Spon, London 1995.
6. Murzewski J.: Niezawodność konstrukcji inżynierskich. Arkady, Warszawa 1989.

Recenzent: Dr hab. inż. Lidia Federowicz