

# Badania laboratoryjne zmienności losowej lokalnych cech wytrzymałościowych wybranych stopów aluminium

Justyna Ferenc<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Katedra Konstrukcji Metalowych, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska,  
e-mail: justyna.ferenc@poczta.fm

**Streszczenie:** W referacie zaprezentowano wyniki własnych badań cech mechanicznych wybranych stopów aluminium, reprezentatywnych dla grupy stopów ulepszonych cieplnie oraz dla grupy stopów nieulepszonych cieplnie. Otrzymane rezultaty badań laboratoryjnych opisują przebieg zmian lokalnych cech wytrzymałościowych  $R_e$  i  $R_m$  wzdłuż osi badanych prętów, a także zmiany modułu sprężystości podłużnej  $E$ . Zestawione w referacie realizacje wskazują, że zmiany cech lokalnych dla prętów o długości fabrykacyjnej mają charakter oscylacji wokół wartości średnich. Model matematyczny opisujący tego typu zmienność stanowi szum losowy, czyli losowe wahania wokół wartości centralnej.

**Słowa kluczowe:** aluminium, badania, jednorodność, zmienność

## 1. Wprowadzenie

Przebieg zmian lokalnych cech wytrzymałościowych wzdłuż osi pręta stosunkowo łatwo może być zbadany na próbkach rozciąganych, wykonanych ze stali zbrojeniowej lub na próbkach z płaskowników bądź kształtowników walcowanych. Wyniki krajowych badań [1] granicy plastyczności  $R_e$  i wytrzymałości na rozciąganie  $R_m$  próbek, na które pocięto zwój o długości 180m z krajowej stali zbrojeniowej o średnicy  $\phi$  6mm wskazują, że zmiany lokalnych cech  $R_e$  i  $R_m$  wzdłuż pręta mają charakter oscylacji wokół trendu a nie oscylacji wokół wartości średniej dla całego zwoju. Podobny typ zmienności cech lokalnych otrzymano w tych samych badaniach dla dwóch innych kręgów stali zbrojeniowej, a także w niezależnych badaniach [2]. W przypadku wytrzymałości drutu stalowego zwijanego w kręgi, obecność trendu  $R$ . Kozak w pracy [2] uzasadniał zróżnicowaniem wielkości ziaren krystalicznych stali, spowodowanym różnicą prędkości stygnięcia po walcowaniu zewnętrznym i wewnętrznym części kręgu. Model matematyczny opisujący tego typu zmienność stanowi suma szumu losowego, czyli losowych wahań wokół wartości zerowej, trendu i ewentualnie składnika okresowego. Wyroby hutnicze stanowiące elementy budowlanych konstrukcji stalowych mają długości fabrykacyjne od kilku do kilkunastu metrów i stygną po walcowaniu w innych warunkach aniżeli drut zbrojeniowy. Ocena zmienności lokalnych cech wytrzymałościowych takich wyrobów ze stali St3S została przeprowadzona w pracy [3] na płaskownikach 20x8mm, o długości 6,00m. Otrzymane w pracy [3] ciągi wartości  $R_e$  i  $R_m$  – traktowane, jako realizacje funkcji losowych, charakteryzuje szum losowy.

Właściwości mechaniczne stopów aluminium zależą od zawartości dodatków stopowych, a także od rodzaju obróbki termicznej lub mechanicznej. Wpływ ulepszenia cieplnego na wytrzymałość stopu jest specyficzną cechą stopów aluminium (stal takich właściwości nie posiada), która może wpływać w sposób istotny na jednorodność cech wytrzymałościowych wzdłuż osi pręta.

## 2. Koncepcja badań doświadczalnych

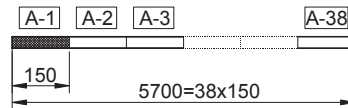
Ocenę zmienności cech wytrzymałościowych prętów aluminiowych o długości fabrykacyjnej przeprowadzono, realizując testy doświadczalne w Laboratorium Badawczym Politechniki Krakowskiej, które mają charakter badań podstawowych. Do badań wytypowano pręty okrągłe wykonane z dwóch stopów: z grupy ulepszonych cieplnie

– stop AW-6060 T6 (klasa trwałości B) oraz z grupy nieulepszonych cieplnie – stop AW-5754 H14 (klasa trwałości A).

Stop AW-6060 w stanie T6 dla prętów o średnicy  $D \leq 15 \text{ mm}$  charakteryzują następujące minima hutnicze: nominalna granica plastyczności  $R_e = 140 \text{ MPa}$ , nominalna wytrzymałość na rozciąganie  $R_m = 170 \text{ MPa}$ , nominalny moduł sprężystości podłużnej  $E = 70 \text{ GPa}$ .

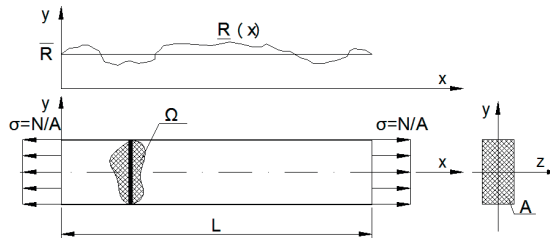
Stop AW-5457 w stanie H14 dla prętów o średnicy  $D \leq 15 \text{ mm}$  charakteryzują następujące minima hutnicze: nominalna granica plastyczności  $R_e = 85 \text{ MPa}$ , nominalna wytrzymałość na rozciąganie  $R_m = 180 \text{ MPa}$ , nominalny moduł sprężystości podłużnej  $E = 70 \text{ GPa}$ .

Badaniom poddano 3 pręty okrągłe o średnicy  $D = 12 \text{ mm}$  ze stopu AW-6060 T6 o długości 6 m każdy oraz 4 pręty ze stopu AW-5754 H14 o długości 3 m każdy. Pręty podzielono na odcinki długości 15 cm a następnie ponumerowano według schematu, jak przedstawiono na rys.1. Pręty z pierwszej partii (AW-6060 T6) oznaczono, jako A, B i D a następnie z każdego pręta wycięto próbki oznaczone kolejno (tak by można było odtworzyć ich pierwotne miejsce w przecie) jako A1, A2...A38 dla pręta A oraz analogicznie dla prętów B i D. Łącznie uzyskano liczbę 113 próbek. Pręty z drugiej partii (AW-5754 H14) oznaczono jako E, F, G i H łącznie uzyskano liczbę 73 próbek.



Rys. 1. Schemat numeracji próbek

Dzięki tak przyjętej numeracji próbek po badaniu można odtworzyć ich pierwotne położenie na długości prętów. Wartości właściwości mechanicznych otrzymane w wyniku statycznej próby rozciągania m.in. wytrzymałość na rozciąganie  $R_m$ , granicę plastyczności  $R_e$  umownie przyporządkowano środkom długości bazowej próbek a następnie przyporządkowano punktom osi podłużnej pręta (rys.2)

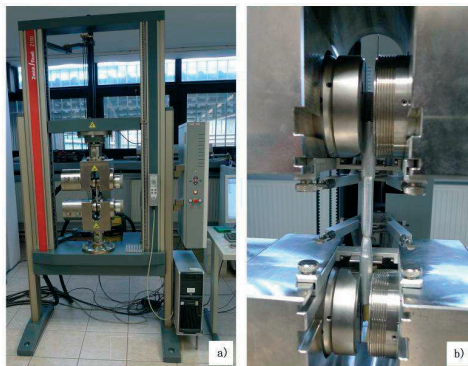


Rys. 2. Koncepcja modelu kontynualnego wytrzymałości pręta rozciąganego; źródło: [3] rys. 4.16

Dzięki temu otrzymuje się funkcję losową argumentu ciągłego  $R(x)$  dla  $x \in \langle 0, L \rangle$ .  $R_j(x)$  jako pojedyncza realizacja, charakteryzuje hipotetyczną populację generalną związaną z pojedynczym prętem, pochodzącym z jednego cyklu produkcyjnego [4].

## 2.1. Statyczna próba rozciągania

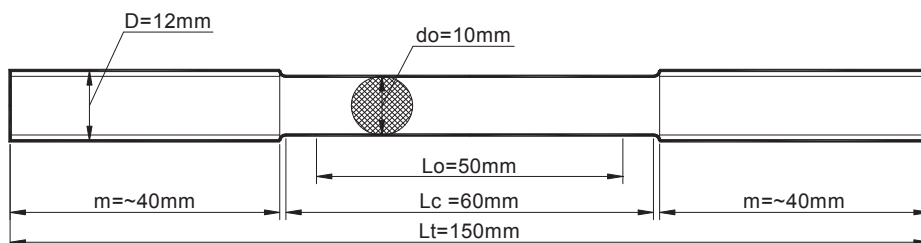
Pomiary cech wytrzymałościowych wykonano poprzez statyczną próbę rozciągania przy użyciu elektro-mechanicznej maszyny wytrzymałościowej Zwick, wyposażonej w ekstensometr o zakresie pomiarowym 2,4 kN do 1200 kN w klasie 1 (rys 3a), z wykorzystaniem wspomaganego komputerowo systemu pomiarowego.



Rys. 3. Statyczna próba rozciągania:

a) maszyna wytrzymałościowa Zwick Roell Z100, b) mocowanie rozciąganej próbki w szczękach.

Do badań przygotowano próbki proporcjonalne (rys.4) o przekroju okrągłym zgodnie z zaleceniami normy [5]. Dla tak przygotowanych próbek przeprowadzono statyczną próbę rozciągania, dzięki której otrzymano informacje o cechach lokalnych minimalnych na odcinku równym bazie pomiarowej próbki.



Rys. 4. Próбка okrągła proporcjonalna

Badania przeprowadzono w temperaturze otoczenia, zakres pomiarowy maszyny wytrzymałościowej został ustalony zgodnie z zaleceniami normy [5]. Zamocowanie próbki (rys.3b) zapewniające zgodność osi próbki z kierunkiem rozciągania, zapobiegające poślizgowi i wysuwaniu się próbki z uchwytów, odkształceniu główek i rozerwaniu próbki poza bazą pomiarową.

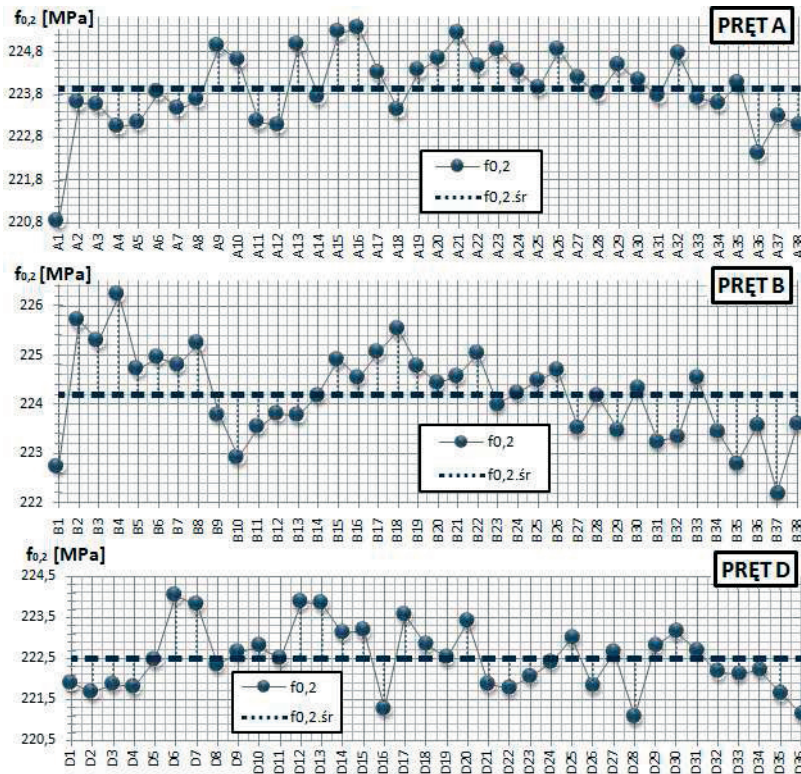
### 3. Wyniki badań laboratoryjnych

Przed przystąpieniem do statycznej próby rozciągania przeprowadzono pomiary grubości w celu kontrolnego oszacowania jednorodności partii prętów metodą analizy wariancji (ANOVA). Grubości próbek mierzone w dwóch prostopadłych do siebie kierunkach. Do analizy przyjęto średnią z dwóch pomiarów, w trzech przekrojach na długości bazy pomiarowej każdej próbki. Grubość pojedynczej próbki przyjęto, jako średnią z trzech przekrojów G1, G2 i G3, dla których pomierzono grubości w dwóch prostopadłych do siebie kierunkach. Pomiary grubości wykorzystano do stwierdzenia małej zmienności tej wielkości, która nie ma istotnego wpływu na wyniki statycznej próby rozciągania. W celu zbadania istotności zmiennej grubości wzdłuż próbek na wyniki próby rozciągania wykorzystano jednoczynnikową analizę wariancji (ANOVA). Wynik analizy wariancji nie dał podstaw do odrzucenia hipotezy o jednorodności partii prętów pod względem grubości.

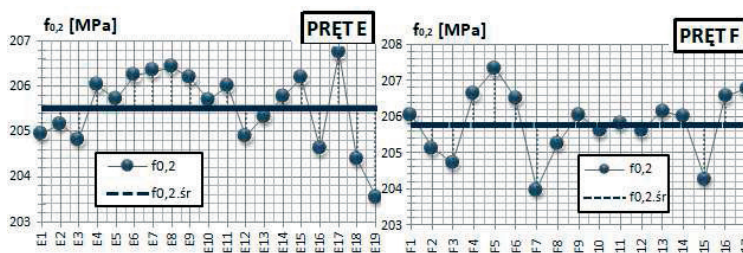
#### 3.1. Ciągi wartości granicy plastyczności

Realizacje umownej granicy plastyczności  $f_{0,2}$  odpowiadają wynikom statycznej próby rozciągania dla kolejnych 38 próbek wyciętych z pręta A, 38 próbek z pręta B oraz

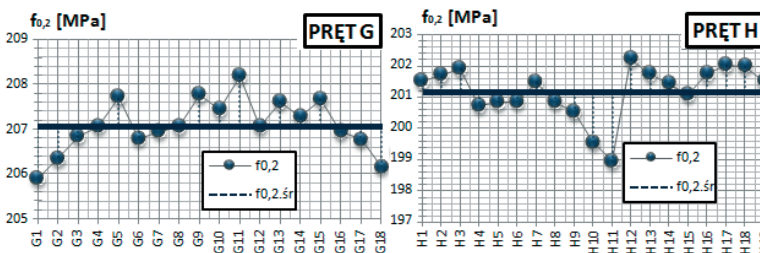
36 próbek z pręta D. Wartości  $f_{0,2}$  przypisano środkom długości bazowej próbek i uszeregowano według pierwotnego położenia w pręcie, co przedstawiono na wykresach (rys.5).



Rys. 5. Pręt A, B, D – realizacja pomiarów granicy plastyczności  $f_{0,2}$



Rys. 6. Pręt E, F, – realizacje pomiarów granicy plastyczności  $f_{0,2}$

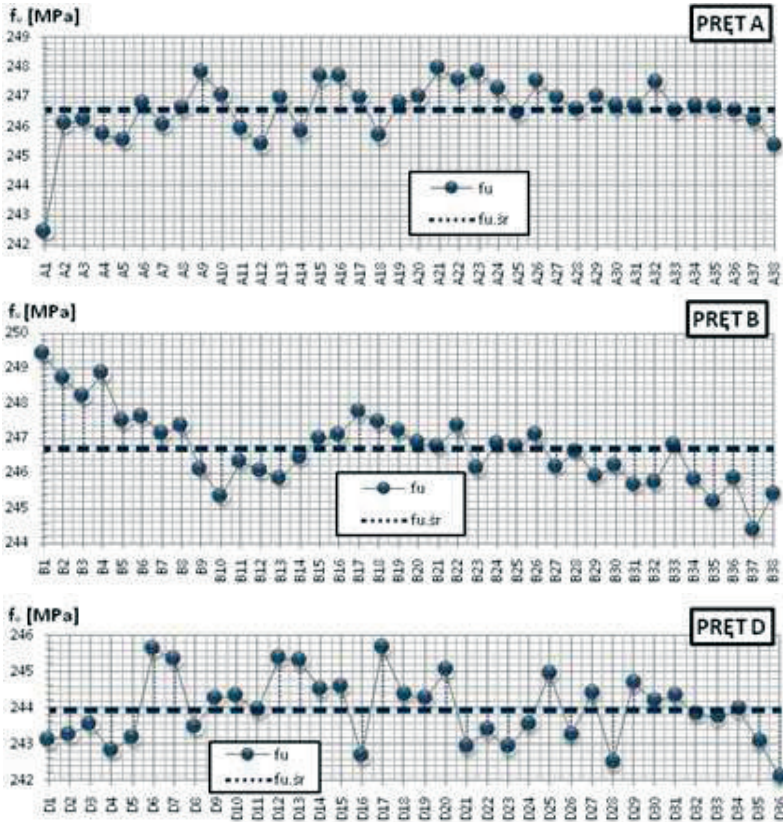


Rys. 7. Pręt G, H – realizacje pomiarów granicy plastyczności  $f_{0,2}$

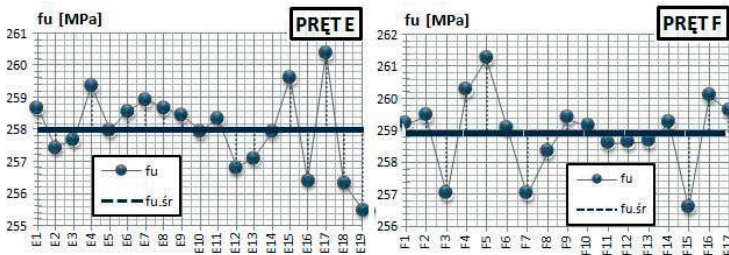
Na wykresach (rys.6,7) przedstawiono realizacje umownej granicy plastyczności  $f_{0,2}$  dla kolejnych 19 próbek wyciętych z pręta E, 17 próbek z pręta F oraz 18 próbek z pręta G oraz 19 próbek z pręta H.

### 3.2. Ciągi wartości wytrzymałości na rozciąganie

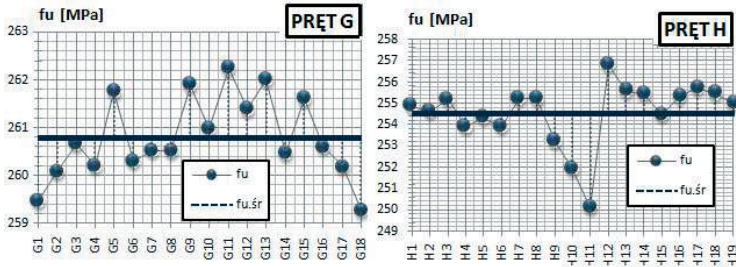
Na wykresach (rys.8) przedstawiono realizacje  $f_{0,2}$  odpowiadające wynikom statycznej próby rozciągania dla kolejnych 38 próbek wyciętych z pręta A, 38 próbek z pręta B oraz 36 z pręta D oraz 19 próbek wyciętych z pręta E, 17 próbek z pręta F (rys.9) i 18 próbek z pręta G oraz 19 próbek z pręta H (rys.10).



Rys. 8. Pręt A, B, D – realizacje pomiarów wytrzymałości na rozciąganie  $f_u$

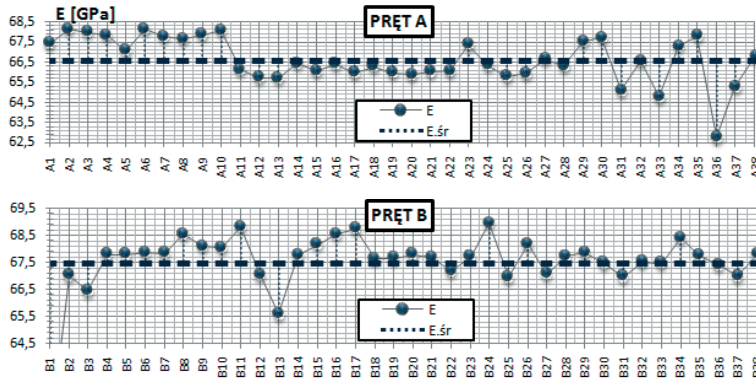
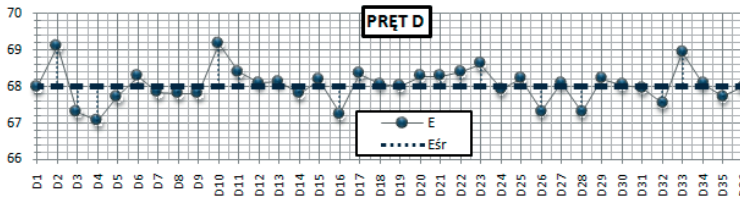


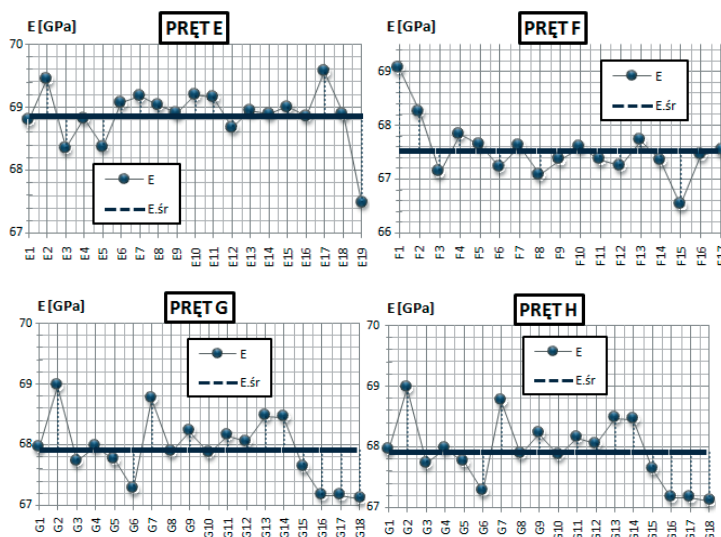
Rys. 9. Pręt E i F – realizacje pomiarów wytrzymałości na rozciąganie  $f_u$

Rys. 10. Pręt G i H – realizacje pomiarów granicy wytrzymałości  $f_u$ 

#### 4. Ciągi wartości modułu sprężystości $E$

Moduł sprężystości oszacowano przy użyciu programu komputerowego (obsługującego maszynę wytrzymałościową, na której została przeprowadzona próba rozciągania) dla naprężeń w przedziale od około 25% do 50% wartości umownej granicy plastyczności. Do obliczeń modułu sprężystości  $E$  zastosowano model korelacji liniowej. Rozrzut oszacowanych w ten sposób wartości  $E$  przedstawiono na rys.11-13.

Rys. 11. Pręt A, B – realizacje pomiarów modułu sprężystości  $E$ Rys. 12. Pręt D – realizacje pomiarów modułu sprężystości  $E$



Rys. 13. Pręt E, F, G, H – realizacje pomiarów modułu sprężystości  $E$

### 5. Podsumowanie

Przeprowadzone badania właściwości mechanicznych wybranych stopów aluminium, przedstawiono graficznie na kolejnych rysunkach (rys. 5÷ rys. 13), jako realizacje funkcji losowych odpowiadających hipotetycznej populacji generalnej prętów spełniających wymagania jednorodności. Obliczone parametry statystyczne dla otrzymanych ciągów losowych: wartości średnie, odchylenia standardowe i współczynniki zmienności dla poszczególnych prętów z serii EN-AW 6060 zestawiono w tabeli 1, a dla prętów z serii EN-AW 5754 w tabeli 2.

Tabela 1. Zestawienie wyników pomiarów modułu sprężystości  $E$ , granicy plastyczności  $R_{p0,2}$ , wytrzymałości na rozciąganie  $R_m$  i wydłużenia względnego  $A_{50}$  dla prętów z serii EN-AW 6060

	PRĘT A			PRĘT B			PRĘT D		
Liczba próbek n	38			37			36		
	$\bar{x}$	s	$\nu$ [%]	$\bar{x}$	s	$\nu$ [%]	$\bar{x}$	s	$\nu$ [%]
$E$ , GPa	66,59	1,13	1,69	67,51	1,28	1,89	68,04	0,48	0,70
$R_{p0,2}$ , MPa	223,94	0,88	0,39	224,22	0,89	0,40	222,51	0,78	0,35
$R_m$ , MPa	246,57	0,98	0,40	246,72	1,05	0,43	243,95	0,92	0,38
$A_{50}$ , %	16,60	1,03	6,18	16,02	0,84	5,26	15,35	0,76	4,97

Tabela 2. Zestawienie wyników pomiarów modułu sprężystości  $E$ , granicy plastyczności  $R_{p0,2}$ , wytrzymałości na rozciąganie  $R_m$  i wydłużenia względnego  $A_{50}$  dla prętów z serii EN-AW 5754

	PRĘT E			PRĘT F			PRĘT G			PRĘT H		
n	19 próbek			17 próbek			18 próbek			19 próbek		
	$\bar{x}$	s	$\nu$ [%]	$\bar{x}$	s	$\nu$ [%]	$\bar{x}$	s	$\nu$ [%]	$\bar{x}$	s	$\nu$ [%]
$E$ , GPa	68,87	0,45	0,65	67,53	0,54	0,80	67,92	0,52	0,30	69,38	0,42	0,60
$R_{p0,2}$ , MPa	205,54	0,82	0,40	205,79	0,90	0,44	207,08	0,57	0,28	201,19	0,85	0,42
$R_m$ , MPa	258,00	1,22	0,47	258,91	1,20	0,46	260,79	0,84	0,32	254,56	1,50	0,59
$A_{50}$ , %	17,60	0,42	2,36	17,22	0,32	1,85	17,16	0,36	2,07	17,29	0,95	5,48

Otrzymane rezultaty wskazują na niewielką niejednorodność stochastyczną badanych mechanicznych cech lokalnych. W szczególności współczynniki zmienności umownej granicy plastyczności  $R_{p0.2}$  i wytrzymałości na rozzerwanie  $R_m$  są mniejsze od 1 % (por. v wg tabeli 2 i tabeli 3). Dla porównania można przywołać analogiczne rezultaty badań przeprowadzonych w latach 1970. w pracy [3] dla płaskowników wykonanych ze stali St3S, gdzie otrzymano wartości współczynników zmienności  $v=2,4\div 2,8$  %. Różnice w wielkości odchyłek pomiarowych a także w rozrzucie poszczególnych realizacji od wartości centralnej opisanych współczynnikiem zmienności wyrobów aluminiowych i stalowych zaobserwowano także w pracy [6]. Należy zauważyć, że próby wytrzymałości przeprowadzono w tamtym czasie na maszynach wytrzymałościowych starszej generacji, które nie były wyposażone w elektroniczne systemy rejestracji pomiarów, zatem pojedyncze realizacje były mniej dokładne niż rejestrowane współcześnie. Z tych względów badania lokalnych cech wytrzymałościowych wyrobów stalowych być może należałoby powtórzyć.

## Literatura

- 1 Jastrzębski P.: Wpływ długości rozciąganych osiowo prętów stalowych na ich wytrzymałość. Rozprawy Inżynierskie, nr 4/1961.
- 2 Kozak R.: Zagadnienia wytrzymałościowe i technologia drutów wysokich wytrzymałości. Inżynieria i Budownictwo, nr 4/1961.
- 3 Machowski A.: Experimental evaluation of random function of hardness for structural steel. Bulletin de l'Académie Polonaise des Sciences, vol. XXVII, No. 7/1979.
- 4 Gwóźdz M., Machowski A.: Badania i obliczenia konstrukcji budowlanych metodami probabilistycznymi. Wydawnictwo PK, Kraków 2010.
- 5 PN-EN ISO 6892-1: 2010 – Metale. Próba rozciągania: Metoda badania w temperaturze pokojowej.
- 6 Gwóźdz M.: Stany graniczne konstrukcji aluminiowych. Wydawnictwo PK, Kraków 2007

## The experimental research on the random variability in the local strength of the selected aluminum alloys

Justyna Ferenc<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Metal Structures, Faculty of Civil Engineering, Cracow University of Technology,  
e-mail: justyna.ferenc@poczta.fm

**Abstract:** This paper presents the results of the experimental research on mechanical properties of selected aluminum alloys, representative of the heat treated alloys (6xxx series) and the strengthened one from cold working only alloys (5xxx series). Results of laboratory tests, which describe the local changes of the strength characteristics of  $R_e$ ,  $R_m$  and Young's modulus  $E$ , indicate that variability in the local characteristics of the bars are oscillations around the average values along the axis of the bars. A mathematical model for describing this type of variation is random noise, or random fluctuations around a central value.

**Keywords:** aluminum, testing, homogeneity, variability