

# Statystyczna interpretacja wyników pomiarów wytrzymałości połączeń adhezyjnych wybranych materiałów konstrukcyjnych

## Statistical interpretation of measurement result of adhesive joints strength of selected engineering materials

IZABELA MITURSKA  
ANNA RUDAWSKA\*

DOI: 10.17814/mechanik.2016.11.463

Dokonano interpretacji wyników pomiarów wytrzymałości na ścinanie połączeń adhezyjnych blachy nierdzewnej. Wyznaczono parametry statystyki opisowej i przedstawiono ich fizyczne znaczenie. Zaprezentowano schemat określania normalności rozkładu. Do wykonania obliczeń i graficznego przedstawienia rozwiązań wykorzystano program STATISTICA.

**SŁOWA KLUCZOWE:** kompozycja klejowa, połączenie klejowe, wytrzymałość, interpretacja statystyczna

*The paper presents the statistical interpretation of the results of strength measurements of stainless steel adhesive joints. The parameters of descriptive statistics and presented their physical meaning was determined. Was presented the scheme for determining the normality of distribution. To calculation and presentation of graphic solutions was used STATISTICA program.*

**KEYWORDS:** adhesive compounds, adhesive joint, strength, statistical interpretation

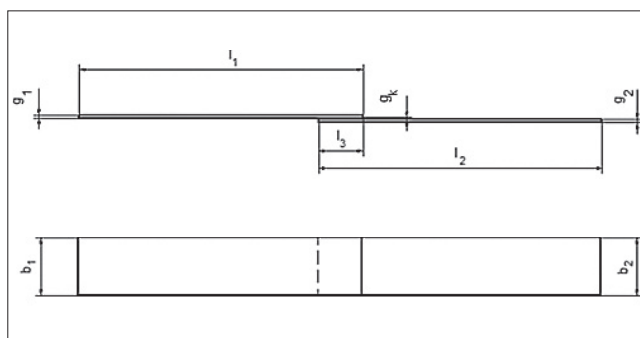
Pomiary wytrzymałości mogą dotyczyć połączeń adhezyjnych albo próbek z różnych materiałów konstrukcyjnych. Sposoby pomiaru w zależności od warunków przeprowadzania prób wytrzymałościowych są szczegółowo opisywane w normach [4].

Najistotniejszym czynnikiem jest wytrzymałość doraźna połączenia. Badania wytrzymałościowe pozwalają na ocenę wytrzymałości spoiny klejowej oraz całej technologii przygotowania powierzchni materiałów i klejenia. W trakcie badań mierzona jest siła niszcząca próbkę przy ustalonej prędkości narastania obciążenia. Warunki przeprowadzania prób statycznej wytrzymałości połączeń klejowych są ściśle określone w normach, które uwzględniają rozmiary próbek, rodzaje połączenia i kierunki działania siły [3]. Najczęściej stosowana jest próba oznaczenia wytrzymałości na ścinanie. Wyniki znormalizowanych badań wytrzymałościowych połączeń adhezyjnych zazwyczaj nie umożliwiają obliczenia wytrzymałości projektowanego połączenia. Dlatego przeprowadza się próby niszczące połączeń o określonych wymiarach i sposobie obciążenia.

Praca dotyczy interpretacji wyników pomiarów wytrzymałości na ścinanie połączeń adhezyjnych wybranych materiałów konstrukcyjnych. Podstawą interpretacji będzie analiza statystyczna.

### Metodyka badań – charakterystyka wykorzystanych materiałów i wykonanych połączeń

Przedmiotem badań były jednozakładkowe połączenia klejowe. Materiałem łączonym była blacha nierdzewna austenityczna 1.4401 (rys. 1).



Rys. 1. Badane połączenia jednozakładkowe blach nierdzewnych

Wymiary uzyskane po wykonaniu połączeń klejowych są następujące:

$l_1 = l_2 = 100$  mm – długość blach,

$l_3 = 16,00 \pm 3,34$  mm – długość zakładki,

$g_1, g_2 = 1$  mm – grubość blach,

$g_k = 0,10 \pm 0,07$  mm – grubość spoiny klejowej,

$b_1, b_2 = 20$  mm – szerokość blach.

Graniczną długość zakładki  $l_{gr}$  obliczono ze wzoru (1), zakładając jednakową grubość łączonych blach [8]:

$$l_{gr} \geq 5 \sqrt{\frac{E g g_k}{2 G_k}} \quad (1)$$

gdzie:

$E = 2,1 \cdot 10^5$  MPa – współczynnik sprężystości wzdłużnej klejonych elementów,

$g = 0,96$  mm – grubość klejonych blach,

$g_k = 0,10$  mm – grubość spoiny klejowej,

$G_k = 1000$  MPa – współczynnik sprężystości poprzecznej kleju.

### Metodyka badań – warunki wykonywania połączeń

Przed przystąpieniem do klejenia powierzchnie łączonych blach zostały oczyszczone [6, 7] oraz przygotowane z wykorzystaniem sześciu sposobów przygotowania powierzchni, które przedstawiono w tabl. I. Przygotowane blachy łączono za pomocą dwuskładnikowego kleju epoksydowego Loctite 9466 A&B. Masa klejowa (żywica + utwardzacz) została sporządzona w stosunku objętościowym 2:1, tuż przed nałożeniem kleju na jedną z łączonych powierzchni.

Połączenia wykonywano w warunkach laboratoryjnych, gdzie temperatura wynosiła  $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ , a wilgotność była na poziomie  $31\% \pm 2\%$ . Próbki sezonowano przez 48 h pod obciążeniem  $1,54 \cdot 10^{-2}$  MPa. Po upływie tego czasu próbki poddano badaniom niszczącym na maszynie wytrzymałościowej Zwick/Roell Z150. Badania wytrzymałościowe przeprowadzono zgodnie z normą EN DIN 1465, z prędkością 5 mm/min.

\* Mgr inż. Izabela Miturska (i.miturska@pollub.pl), dr hab. inż. Anna Rudawska prof. PL (a.rudawska@pollub.pl) – Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji, Wydział Mechaniczny Politechniki Lubelskiej

TABLICA I. Warianty przygotowania powierzchni klejonych materiałów

Wariant	Opis sposobu przygotowania powierzchni	Rodzaj odtłuszczacza
I	Odtłuszczenie I	Loctite 7061
II	Odtłuszczenie II	Loctite 7063
III	Odtłuszczenie III	aceton
IV	Obróbka mechaniczna za pomocą ściernych narzędzi nasypowych z użyciem papieru ściernego P320 + odtłuszczenie I	Loctite 7061
V	Obróbka mechaniczna za pomocą ściernych narzędzi nasypowych z użyciem papieru ściernego P320 + odtłuszczenie II	Loctite 7063
VI	Obróbka mechaniczna za pomocą ściernych narzędzi nasypowych z użyciem papieru ściernego P320 + odtłuszczenie III	aceton

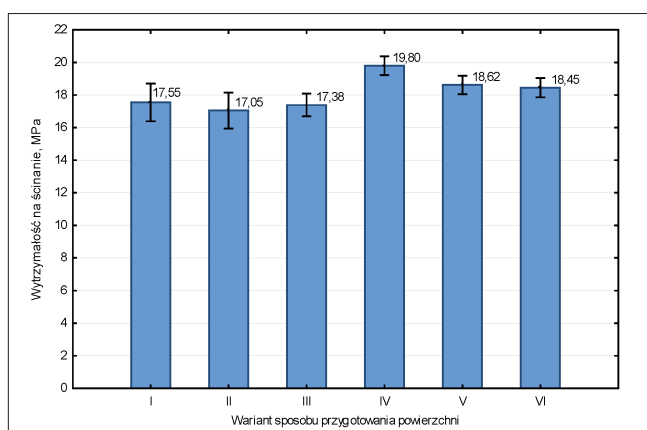
TABLICA II. Parametry statystyki dla wartości wytrzymałości na ścinanie

Sposób przygotowania powierzchni	Parametry statystyki opisowej wartości wytrzymałości								
	średnia	mediana	moda	liczność mody	rozstęp	wariancja	odch.std	skośność	kurtóza
I	17,550	17,550	Wielokr.	1	2,7000	1,3500	1,1619	0,0000	-1,200
II	17,050	16,600	16,60000	2	2,4000	1,2300	1,1091	1,9001	3,709
III	17,383	17,500	18,00000	2	1,7000	0,4857	0,6969	-0,6591	-1,009
IV	19,800	19,850	20,30000	2	1,1000	0,3400	0,5831	-0,1009	-5,420
V	18,620	18,400	Wielokr.	2	1,3000	0,3220	0,5675	-0,0099	-1,975
VI	18,450	18,400	Wielokr.	1	1,2000	0,3500	0,5916	0,1932	-4,629

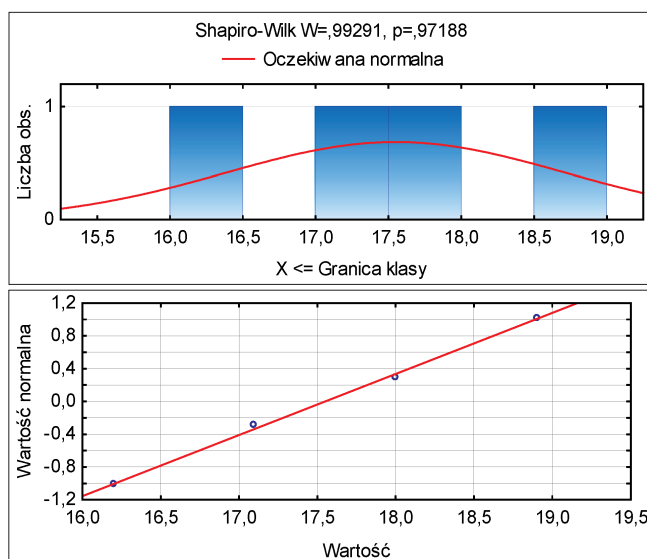
### Wyniki badań wytrzymałościowych

Wyniki badań wytrzymałościowych połączeń adhezyjnych przedstawiono na rys. 2.

W tabl. II. zaprezentowano wartości statystyki opisowej dla uzyskanych wyników, dzięki którym możliwa będzie dalsza analiza statystyczna [1,5].

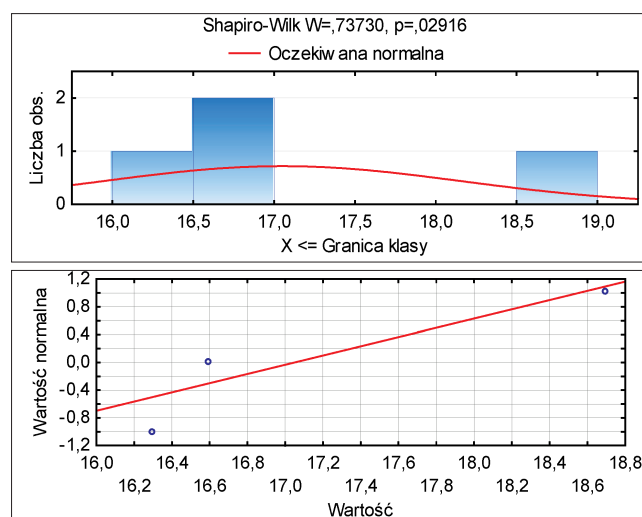


Rys. 2. Wytrzymałość połączeń klejowych blach nierdzewnych po zastosowaniu różnych sposobów przygotowania powierzchni

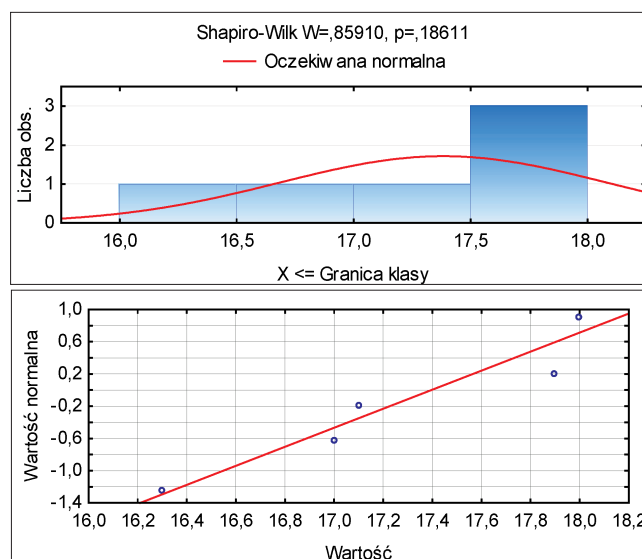


Rys. 3. Histogram rozkładu wyników (I sposób przygotowania powierzchni) i wykres normalności rozkładu

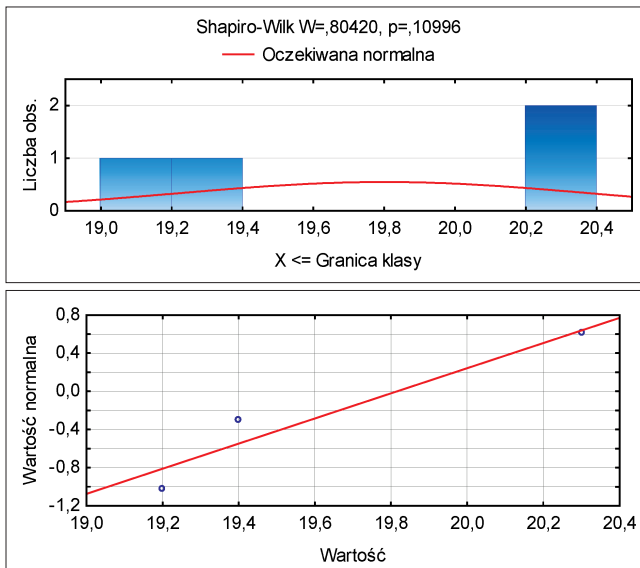
Histogramy obrazujące normalność rozkładu z nałożoną dopasowaną krzywą gęstości rozkładu normalnego i wyliczeniami testu Shapiro-Wilka [2, 9] oraz wykresy normalności zaprezentowano na rys. 3–8.



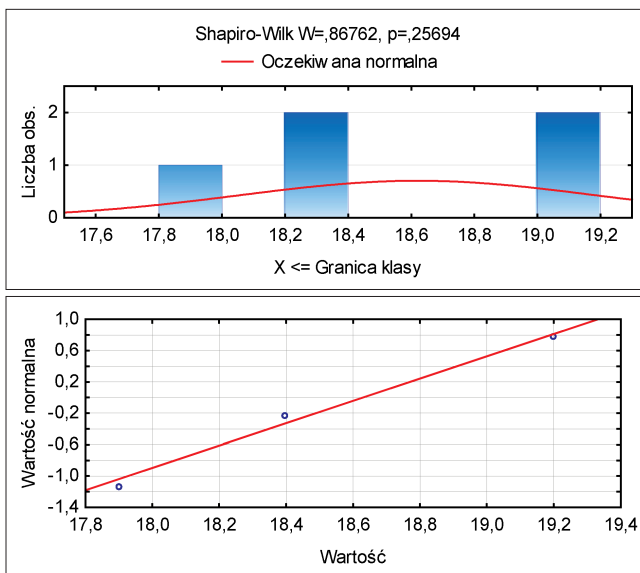
Rys. 4. Histogram rozkładu wyników (II sposób przygotowania powierzchni) i wykres normalności rozkładu



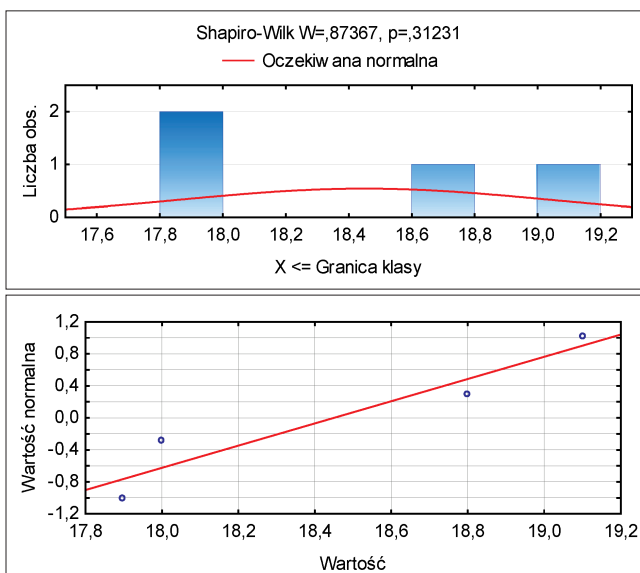
Rys. 5. Histogram rozkładu wyników (III sposób przygotowania powierzchni) i wykres normalności rozkładu



Rys. 6. Histogram rozkładu wyników (IV sposób przygotowania powierzchni) i wykres normalności rozkładu



Rys. 7. Histogram rozkładu wyników (V sposób przygotowania powierzchni) i wykres normalności rozkładu



Rys. 8. Histogram rozkładu wyników (VI sposób przygotowania powierzchni) i wykres normalności rozkładu

W tabl. III. zebrano wyniki testu Shapiro-Wilka [9]. Badania normalności rozkładu dowiodły, że jedna z prób (II) nie wykazała rozkładu normalnego, dlatego nie była poddawana dalszej analizie. W tabl. IV i V przedstawiono wyniki przeprowadzonych testów i analiz statystycznych [9].

W rozpatrywanym przypadku stwierdzono, że tylko cztery sposoby przygotowania powierzchni, które były ze

TABLICA III. Wyniki testu Shapiro-Wilka sprawdzającego normalność rozkładu

Założenia	$H_0$ : Rozkład badanej próby jest rozkładem normalnym			
	$H_1$ : Rozkład badanej próby nie jest rozkładem normalnym			
Wariant przygot. pow.	$W(\alpha, n)$	$W_{obl}$	$p$	Wynik
I	0,748 <	0,99291	0,97188	Nie ma podstaw do odrzucenia $H_0$ – dane wykazują rozkład normalny
II	0,748 >	0,73730	0,02916	Istnieją podstawy do odrzucenia $H_0$ na rzecz $H_1$ – dane nie wykazują rozkładu normalnego
III	0,803 <	0,8591	0,18611	Nie ma podstaw do odrzucenia $H_0$ – dane wykazują rozkład normalny
IV	0,748 <	0,80420	0,10996	Nie ma podstaw do odrzucenia $H_0$ – dane wykazują rozkład normalny
V	0,762 <	0,86762	0,25694	Nie ma podstaw do odrzucenia $H_0$ – dane wykazują rozkład normalny
VI	0,748 <	0,87367	0,31231	Nie ma podstaw do odrzucenia $H_0$ – dane wykazują rozkład normalny

TABLICA IV. Statystyka testu F

Porównywane próby	Hipoteza	Test F		Wynik	Przyjęty test
		$F_{odczyt.}$	$F_{obl.}$		
I–III	$H_{01}: S_1^2 = S_3^2$	7,76	3,06	$3,06 \notin < 9,76; \infty$ – nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy $H_{01}: S_1^2 = S_3^2$	t-Studenta
IV–V	$H_{02}: S_4^2 = S_5^2$	9,98	1,13	$1,13 \notin < 9,98; \infty$ – nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy $H_{02}: S_4^2 = S_5^2$	t-Studenta
IV–VI	$H_{03}: S_4^2 = S_6^2$	15,40	1,03	$1,03 \notin < 14,4; \infty$ – nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy $H_{03}: S_4^2 = S_6^2$	t-Studenta
V–VI	$H_{04}: S_5^2 = S_6^2$	15,10	1,17	$1,17 \notin < 15,10; \infty$ – nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy $H_{04}: S_5^2 = S_6^2$	t-Studenta

TABLICA V. Statystyka testu t-Studenta

Porównywane próby	Hipoteza	Test t-Studenta		Wynik
		$t_{odczyt.}$	$t_{obl.}$	
I–III	$H_1: \bar{X}_1 = \bar{X}_3$	2,31	0,30	$0,30 \notin (-\infty, -2,31 > U < 2,31; \infty)$ – nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy $H_1: \bar{X}_1 = \bar{X}_3$
IV–V	$H_2: \bar{X}_4 = \bar{X}_5$	2,36	2,75	$2,75 \notin (-\infty, -2,36 > U < 2,36; \infty)$ – odrzucenie hipotezy $H_2$ , zatem $\bar{X}_4 \neq \bar{X}_5$
IV–VI	$H_3: \bar{X}_4 = \bar{X}_6$	2,45	2,65	$2,65 \notin (-\infty, -2,45 > U < 2,45; \infty)$ – odrzucenie hipotezy $H_3$ , zatem $\bar{X}_4 \neq \bar{X}_6$
V–VI	$H_4: \bar{X}_5 = \bar{X}_6$	2,36	0,24	$0,24 \notin (-\infty, -2,36 > U < 2,36; \infty)$ – nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy $H_4: \bar{X}_5 = \bar{X}_6$

sobą porównywane w podziale na poddane i niepoddane obróbce mechanicznej, pozwalają uzyskać statystycznie podobne rezultaty.

### Omówienie wyników badań i wnioski

W dwóch przypadkach na cztery brak jest podstaw do odrzucenia hipotezy o równościach średnich na przyjętym poziomie ufności  $\alpha=0,05$  (tabl. V). Odnosi się to do wariantów I i III przygotowania powierzchni oraz V i VI. W pozostałych przypadkach występują statystycznie znaczące różnice na przyjętym poziomie ufności  $\alpha=0,05$ .

Analizując rezultaty badań przedstawione na rys. 2, w tabl. II. oraz na histogramach (rys. 3–8), można stwierdzić, że najlepszą powtarzalność wyników z najmniejszym rozrzutem zaobserwowano w przypadku IV wariantu przygotowania powierzchni. Jednocześnie w tej obróbce uzyskano największą wytrzymałość, która statystycznie nie jest równa z pozostałymi wynikami. Najmniejsza była wytrzymałość połączeń klejowych próbek przygotowanych według II wariantu, które nie brały również udziału w analizie statystycznej, ponieważ nie wykazały normalności rozkładu badanej cechy. W I wariantcie przygotowania powierzchni rozrzut wyników, odchylenie standardowe oraz wariancja były największe.

Można sformułować następujące wnioski:

- Analiza odchylenia standardowego oraz wariancji wytrzymałości wszystkich połączeń adhezyjnych wskazuje, że w przypadku połączeń, w których zastosowano obróbkę mechaniczną papierem ściernym jako sposób przygotowania powierzchni powtarzalność wyników była największa. Podobną powtarzalnością charakteryzowały się połączenia, w których powierzchnie odtłuszczano

acetonem. Najmniejszą powtarzalność otrzymano po odtłuszczeniu powierzchni za pomocą środków Loctice 7061 i Loctite 7063.

- Największą wytrzymałość na ścinanie uzyskały połączenia, w których powierzchnie poddano obróbce mechanicznej i odtłuszczono środkiem Loctite 7061.
- Obróbka mechaniczna realizowana metodą ręczną za pomocą papieru ściernego pozwala na uzyskanie powtarzalnych rezultatów wytrzymałości na ścinanie połączeń adhezyjnych. Badania były przeprowadzone w warunkach laboratoryjnych, przy określonych parametrach technologicznych procesu. Najprawdopodobniej zmiana parametrów spowodowałaby uzyskanie odmiennej wytrzymałości połączeń klejowych.

### LITERATURA

1. Boryczko A. „Podstawy pomiarów wielkości mechanicznych”. Gdańsk: Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2010.
2. Kotulski Z., Szczepiński W. „Rachunek błędów dla inżynierów”. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2004.
3. PN-EN 1465:2009 – Kleje. Oznaczenie wytrzymałości na ścinanie przy rozciąganiu połączeń na zakładkę.
4. PN-EN ISO 6892-1:2010 – Metale – Próba rozciąganie – Metoda badania w temperaturze pokojowej.
5. Rabiej M. „Statystyka z programem Statistica”. Gliwice: Wydawnictwo Helion, 2012.
6. Rudawska A., Bronisz K. „Wpływ wybranych parametrów obróbki mechanicznej na wytrzymałość połączeń klejowych”. *Technologia i Automatyka Montażu*. Nr 2 (2013): s. 27–30.
7. Rudawska A. „Wpływ sposobu przygotowania powierzchni na wytrzymałość połączeń klejowych blach ze stali odpornej na korozję”. *Technologia i Automatyka Montażu*. Nr 3 (2010): s. 36–39.
8. Rudawska A., Kuczmazewski J. „Klejenie blach ocynkowanych”. Lublin: Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Lubelskiej, 2005.
9. Krysicki W., Bartos J., Dyczka W., Królikowska K., Wasilewski M. „Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna w zadaniach. Cz. II Statystyka matematyczna”. Warszawa: PWN, 2012. ■