



**Probabilistyczny opis parametrów
wytrzymałościowych stali zbrojeniowej
EPSTAL i eksperymentalne
potwierdzenie ich wartości**

**Tadeusz CHMIELEWSKI
Magdalena PIOTROWSKA**



**Probabilistyczny opis parametrów
wytrzymałościowych stali zbrojeniowej
EPSTAL i eksperymentalne
potwierdzenie ich wartości**

**Tadeusz CHMIELEWSKI
Magdalena PIOTROWSKA**

ISBN 978-83-946813-4-0
Copyright© by Centrum Promocji Jakości Stali, 2019
Centrum Promocji Jakości Stali Sp. z o.o.
ul. rtm Witolda Pileckiego 67
02-781 Warszawa
Tel.: +48 22 252 67 03
E-mail: biuro@cpjs.pl
www.epstal.pl

Wprowadzenie

EPSTAL jest znakiem jakości nadawanym w drodze dobrowolnej certyfikacji na wyroby do zbrojenia betonu w postaci prętów lub kręgów żebrowanych ze stali gorącowalcowanej o wysokiej ciągliwości gatunku B500SP. Proces certyfikacji obejmuje sprawdzenie funkcjonowania systemu zarządzania jakością w zakładzie produkcyjnym i wykonanie badań próbek stalowych w laboratorium producenta. Dodatkowo kolejny zestaw próbek wysyłany jest do badania w niezależnym zewnętrznym laboratorium. Utrzymanie certyfikatu EPSTAL wiąże się zaś z koniecznością odpowiedniego znakowania prętów (m.in. trwałym napisem EPSTAL i etykietą), przekazywania do CPJS kwartalnych i rocznych wyników zakładowej kontroli produkcji, posiadania dodatkowego ubezpieczenia na certyfikowane wyroby oraz poddawania się corocznemu audytowi.



Stal EPSTAL jest stalą zbrojeniową, która spełnia wymagania dla gatunku B500SP według norm PN-H-93220:2018-02 [1] i PN-EN 10080:2007 [2]. Spełnia ona również wymagania klasy C wg Eurokodu 2 [3] i klasy A-IIIN wg „starych” polskich norm: PN-B-03264:2002 [4] i PN-S 10042:1991 [5]. Gatunek B500SP oznacza, że jest stalą przeznaczoną do stosowania w budownictwie (B), o wartości charakterystycznej granicy plastyczności równej 500 MPa, stalą spawalną (S) i o podwyższonej ciągliwości (P).

Stal EPSTAL charakteryzują następujące właściwości mechaniczne:

- parametry wytrzymałościowo-odkształceniowe odznaczające się wysoką stabilnością,
- odporność na obciążenia dynamiczne: zmęczeniowe i cykliczne,
- odporność na zginanie z odginaniem,
- bardzo dobra przyczepność do betonu,
- spawalność w pełnym zakresie średnic prętów.

Statyczna próba rozciągania jest podstawowym sposobem określenia właściwości wytrzymałościowo-odkształceniowych stali. Pełna informacja dotycząca zasady przeprowadzania badania próby rozciągania stali, kształtu i wymiarów próbek oraz określenia parametrów badania, tj.: wartości wytrzymałości, wartości wydłużeń i przewężeń próbki wraz z informacją, co powinien zawierać protokół badania, została podana w normie PN-EN ISO 6892-1 [6].

Przedmiotem niniejszej publikacji jest zbadanie zmienności parametrów wytrzymałościowych stali EPSTAL, tj. granicy plastyczności $R_{e0.2}$, wytrzymałości na rozciąganie R_m i wydłużenia pod największym obciążeniem A_{gt} , na podstawie badań wyników statycznej próby rozciągania próbek stali wykonanych przez producentów w ramach zakładowej kontroli produkcji. Analiza statystyczna tych wyników wykazała, że zależność naprężenie-odkształcenie prób rozciągania stali należy opisać w języku rachunku prawdopodobieństwa jako jednowymiarowy proces stochastyczny, zaś trzy najważniejsze parametry wytrzymałościowe: granicę plastyczności, wytrzymałość na rozciąganie i wydłużenie pod największym obciążeniem, jako zmienne losowe. Na podstawie opracowania danych eksperymentalnych stwierdzono, że granica plastyczności i wytrzymałość na rozciąganie prętów produkowanych w latach 2015-2018 mają rozrzut wartości na poziomie mniejszym niż 3%. Ponadto analiza uzyskanych wartości charakterystycznych granicy plastyczności $R_{e,5\%}$ wskazuje na duży zapas w stosunku do wartości wymaganej normowo, tj. 500 MPa.



Próba rozciągania stali EPSTAL jako zjawisko losowe opisane jednowymiarowym procesem stochastycznym

Rozważmy eksperyment, w którym poddaliśmy statycznej próbie rozciągania n próbek stali EPSTAL jednakowej średnicy. Na przykład dla pręta zbrojeniowego o średnicy 16 mm, po zbadaniu na rozciąganie 10 próbek, otrzymaliśmy następujące wyniki dla granicy plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie i wydłużenia pod największym obciążeniem.

Tablica 1. Wartości granicy plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie i wydłużenia dla 10 prób rozciągania pręta zbrojeniowego o średnicy 16 mm.

R_e [MPa]	535	539	539	535	555	566	538	535	548	553
R_m [MPa]	621	631	636	638	652	652	636	635	638	646
A_{gt} [%]	14,5	15	14	13,1	14,3	13,1	13	13,4	15,6	15,1

Powstaje pytanie: które wartości uznać za granicę plastyczności, wytrzymałość na rozciąganie i wydłużenie pod największym obciążeniem? Dla tak postawionego pytania nie ma odpowiedzi w zbiorze wielkości deterministycznych, tj. w zbiorze wielkości, które są dokładnie znane. Można na nie odpowiedzieć jedynie w zbiorze pojęć probabilistycznych, tj. z zastosowaniem pojęć rachunku prawdopodobieństwa, który opisuje zjawiska losowe. Obserwując takie zjawiska stwierdzamy, że przy danym eksperymencie wyniki obserwacji nie są jednakowe, że zachodzą między nimi pewne, nieokreślone rozbieżności. W przypadku stali EPSTAL głównymi źródłami zmienności wartości parametrów mechanicznych R_e , R_m i A_{gt} są:

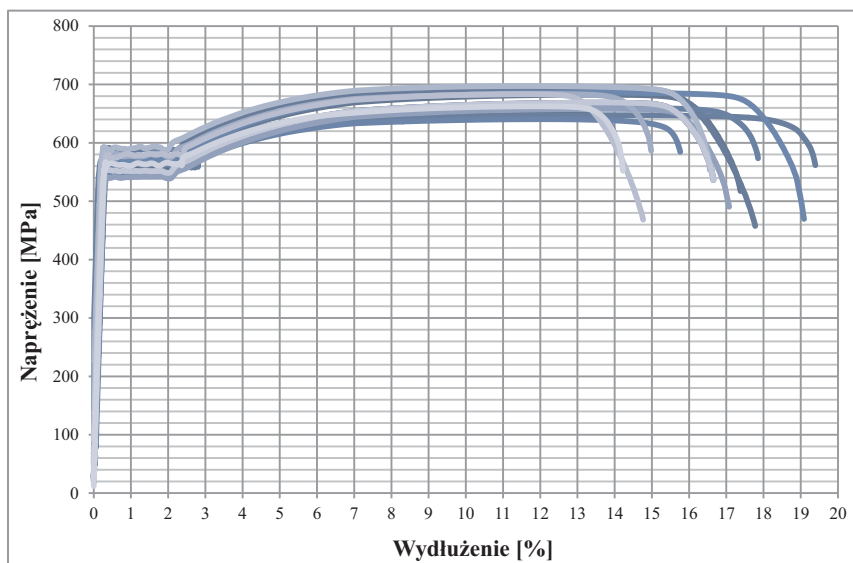
- zmienność właściwości cech materiałów do produkcji wlewków, tj. złomu, żelazostopów (szczególnie zmienność składu chemicznego złomu ma tu decydujące znaczenie i przełożenie na zmienność własności),
- w procesie walcowania: rozrzut temperatury wlewka na jego długości oraz zmienność parametrów wody w kontrolowanym chłodzeniu za ostatnią kłatką walcowniczą (ciśnienie i przepływ).

Istnieje możliwość kontroli tych zmienności tylko w pewnych granicach, np. poprzez korekty przepływu wody celem uzyskania jak najbardziej jednorodnych własności wytrzymałościowych oraz dodatkowo przez ustawienia odpowiedniej strategii nagrzewania wlewków, w celu zmniejszenia rozrzutu temperatur na długości pasma.

Po wykonaniu jednej próby rozciągania próbki stalowej otrzymujemy wykres naprężenie-odkształcenie, który zapisujemy funkcją $\sigma(\varepsilon)$. Rozpatrzmy doświadczenie, w którym dokonaliśmy 15 prób rozciągania próbek stalowych i otrzymaliśmy 15 wykresów naprężenie-odkształcenie. Przyjmijmy, że wykresy te zestawiliśmy na jednym wspólnym rysunku (rys. 1). Na jego podstawie stwierdzamy, że wykresy nie pokrywają się, występują między nimi nieokreślone, przypadkowe rozbieżności. Dlatego na obecnym etapie wiedzy próby rozciągania próbek stalowych i otrzymywane na ich podstawie wykresy naprężenie-odkształcenie opisujemy jako jednowymiarowy proces stochastyczny. Matematycznie opisujemy go zależnością $\sigma(\varepsilon)$, gdzie ε oznacza zdarzenie elementarne polegające na wykonaniu próby rozciągania próbki stalowej.

Z inżynierskiego punktu widzenia korzystna jest następująca interpretacja procesu stochastycznego $\sigma(\varepsilon, e)$:

- Załóżmy, że zaszło zdarzenie elementarne e_i , tj. wykonaliśmy próbę rozciągania jednej próbki. Otrzymaliśmy funkcję $\sigma(e_i) = \sigma(\varepsilon)$ (ponieważ e_i jest ustalone), którą nazywamy realizacją procesu stochastycznego. Po wykonaniu n prób rozciągania otrzymamy n realizacji procesu. Przykład 15 realizacji przedstawiono na rys.1.
- Niech ε jest ustalone, np. $\varepsilon = 1\%$, zaś e jest zmienne. Wówczas otrzymujemy przekrój procesu, który jest zmienną losową. Dla inżynierów budownictwa ważne są dwa przekroje, pierwszy dla granicy plastyczności R_e , drugi dla wytrzymałości na rozciąganie R_m .
- Niech ε i e są ustalone, wówczas otrzymujemy tylko liczbę, którą nazywamy stanem procesu.



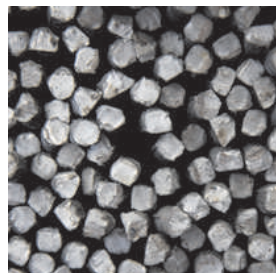
Rys. 1. Zbiorcze zestawienie wykresów naprężenie-odkształcenie dla 15 próbek stalowych poddanych rozciąganiu, które stanowią 15 realizacji procesu stochastycznego $\sigma(\varepsilon, e)$.

Badania eksperymentalne zmiennych losowych R_e , R_m i A_{gt} , ich histogramy i parametry liczbowe

Pełnym probabilistycznym opisem zmiennych losowych ciągłych R_e , R_m i A_{gt} są ich rozkłady prawdopodobieństwa, tj. dystrybuanty lub funkcje gęstości prawdopodobieństwa. Gdy je znamy, to na ich podstawie możemy obliczyć prawdopodobieństwa możliwych zdarzeń, a także parametry liczbowe zmiennych losowych, tj. na przykład wartości średnie, wariancje, odchylenia standardowe itd. Aby wymienione wielkości i wartości poznać, koniecznością jest zebranie danych eksperymentalnych, które w naszym przypadku są wykonywane przez producentów w ramach zakładowej kontroli produkcji. Dla autorów powyższe dane są podstawą przeprowadzenia wnioskowania statystycznego dla potrzeb inżynierów budownictwa.

Wnioskowanie statystyczne obejmują następujące etapy:

- zebranie n danych eksperymentalnych dla każdej zmiennej losowej, które nazywamy próbami;
- sporządzenie histogramów i obliczenie dla nich wybranych parametrów liczbowych;
- przyjęcie teoretycznego rozkładu prawdopodobieństwa i przeprowadzenie jego weryfikacji na podstawie testów statystycznych.



W celu zbadania zmienności parametrów wytrzymałościowych prętów zbrojeniowych stali EPSTAL przyjęto następujące założenie dotyczące liczebności prób: za liczebność próby przyjęto liczbę statycznych prób rozciągania próbek prętów wykonanych w ciągu jednego roku i sporządzono dla nich histogramy, na podstawie których obliczono wybrane estymatory parametrów liczbowych. Na rys. 3, 4 i 5 przedstawiono histogramy granicy plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie i wydłużenia pod największym obciążeniem dla prętów zbrojeniowych o średnicach 10-32 mm produkowanych w latach 2015-2018. W tabeli 2 zestawiono następujące dane oraz wyniki obliczeń:

n – liczebność próby,

$R_{e,sr}$, $R_{m,sr}$, $A_{gt,sr}$ – wartości średnie próby,

s – odchylenie standardowe,

v – współczynnik zmienności,

$R_{e,5\%}$, $R_{m,5\%}$, $A_{gt,5\%}$ – wartości charakterystyczne (5%) danej próby,

$R_{e,min}$, $R_{m,min}$, $A_{gt,min}$ – najmniejsza wartość próby,

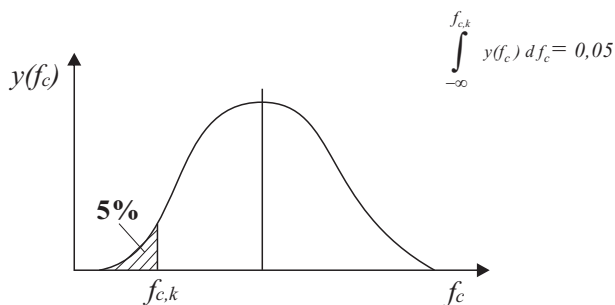
$R_{e,max}$, $R_{m,max}$, $A_{gt,max}$ – największa wartość próby.

Wartości charakterystyczne trzech zmiennych losowych R_e , R_m i A_{gt}

Norma [7], która jest podstawową normą inżynierów budownictwa, w punkcie 4.2 „Właściwości materiałów i wyrobów” podaje następujące definicje właściwości materiałów:

- (1) Zaleca się, aby właściwości materiałów (łącznie z gruntem i skałą) lub wyrobów były określane z podaniem ich właściwości charakterystycznych.
- (2) Jeżeli w EN 1991 do EN 1999 nie podano inaczej to, kiedy dolna wartość materiału jest niekorzystna, wartość charakterystyczną zaleca się ustalać jako kwantyl 5%.

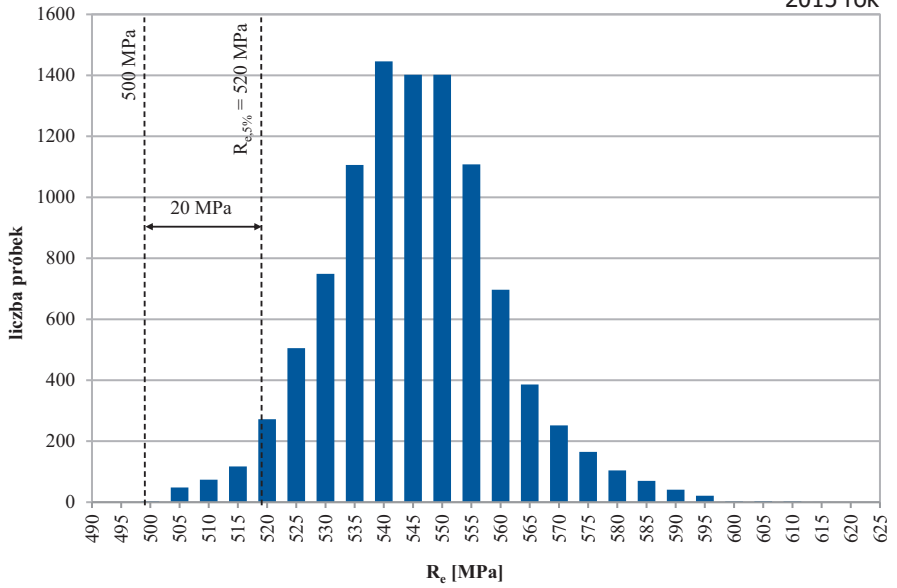
Zgodnie z wyżej wymienioną normą wytrzymałość charakterystyczną zmiennych losowych granicy plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie, które oznaczamy jako $R_{e,5\%}$ i $R_{m,5\%}$, definiujemy następująco: „są to wartości danego parametru, poniżej których może się znaleźć 5% populacji wszystkich możliwych oznaczeń”. A zatem są to wartości obu parametrów osiągnane przez minimum 95% zbadanych próbek dla danej serii prób. W analogiczny sposób definiujemy wartość charakterystyczną zmiennej losowej wydłużenia, $A_{gt,5\%}$. Z rachunku prawdopodobieństwa wartość charakterystyczną danej zmiennej losowej definiuje się precyzyjnie jako kwantyl rzędu 0,05 (5%) zmiennej losowej, co poglądowo przedstawiono na rys. 2, dla przyjętej gęstości prawdopodobieństwa $y(f_c)$ oraz zmiennej losowej f_c .



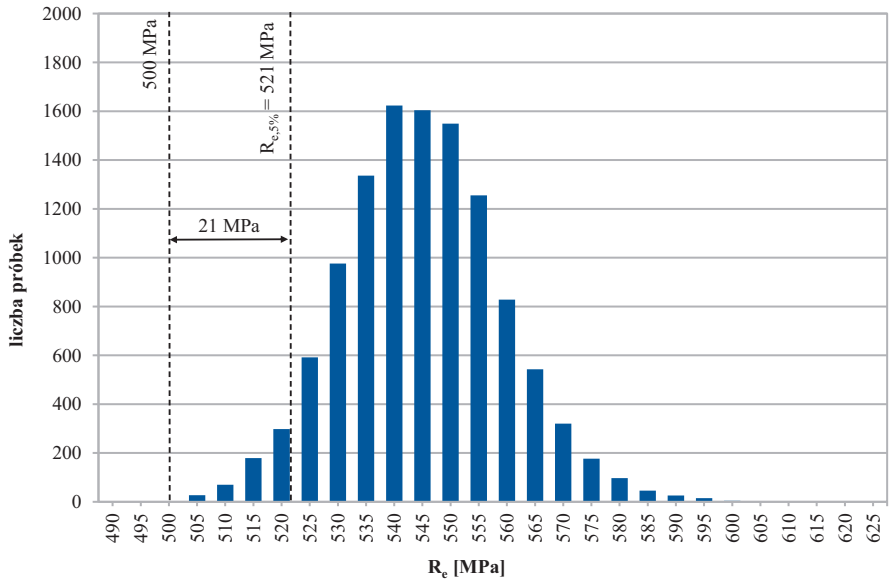
Rys.2. Gęstość prawdopodobieństwa zmiennej losowej f_c z zaznaczeniem jej wytrzymałości charakterystycznej $f_{c,k}$.

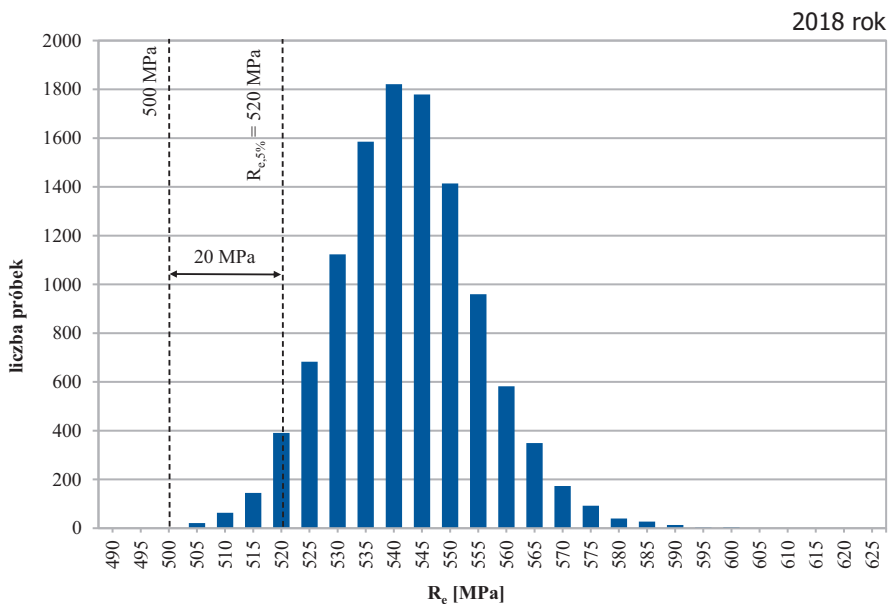
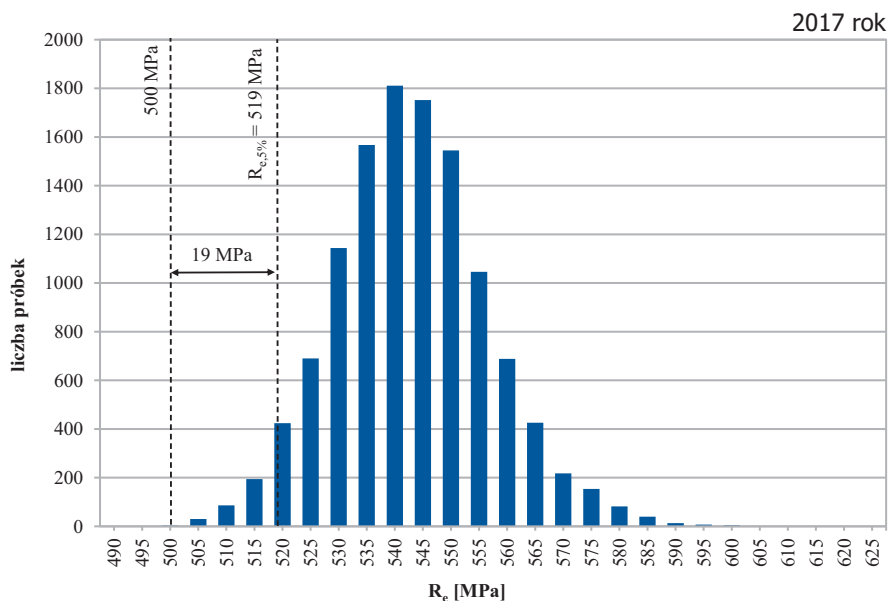


2015 rok

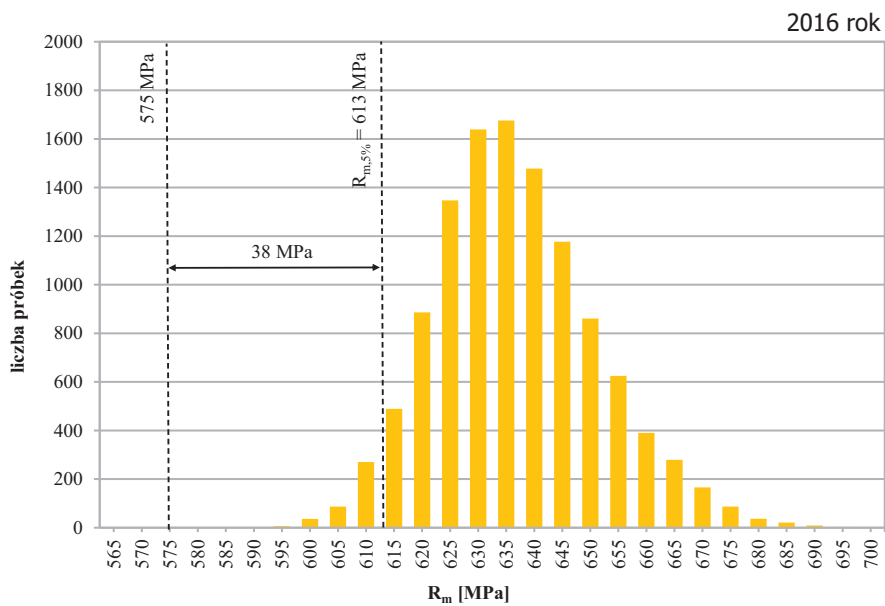
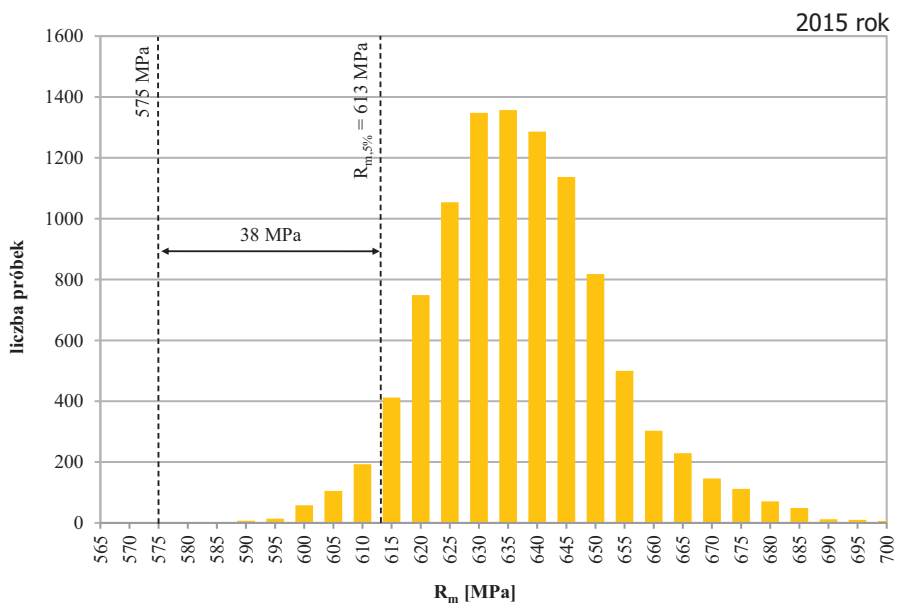


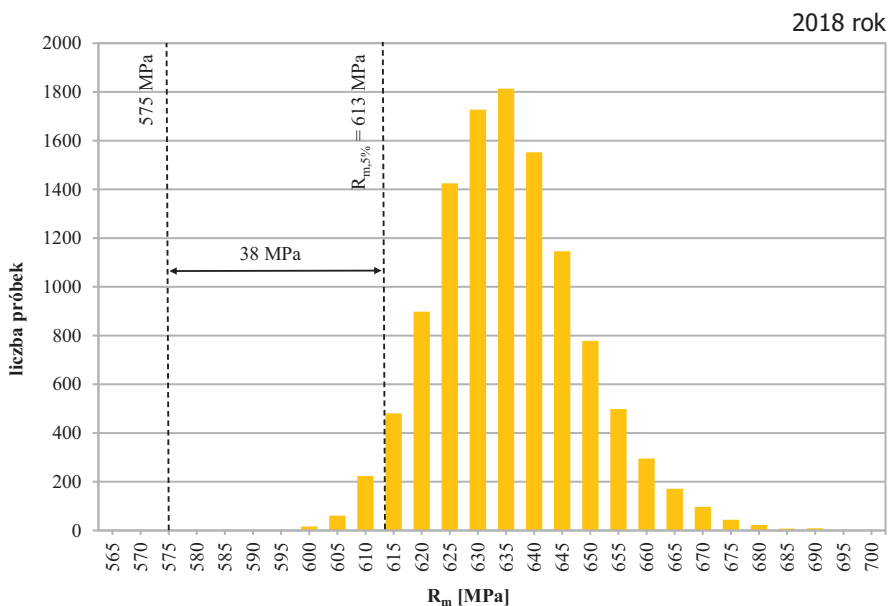
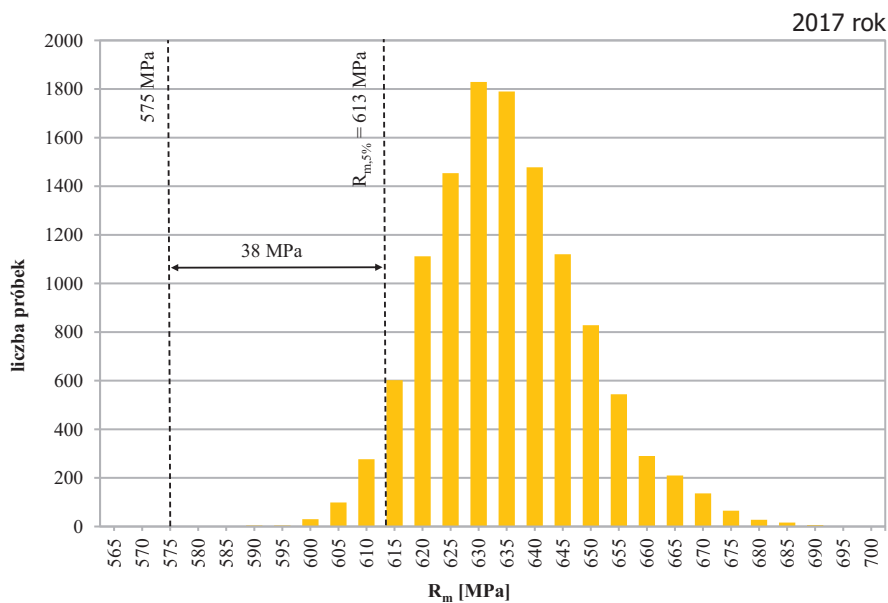
2016 rok



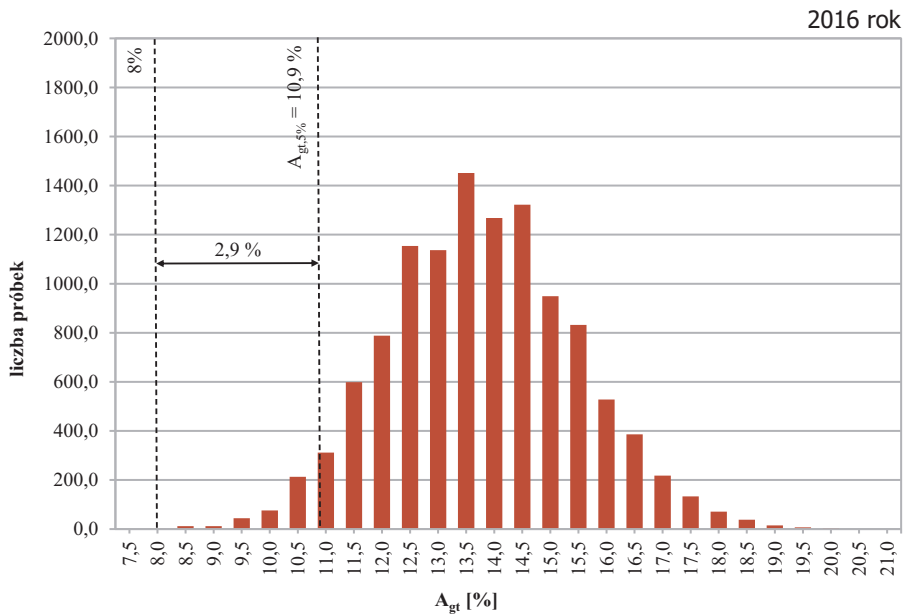
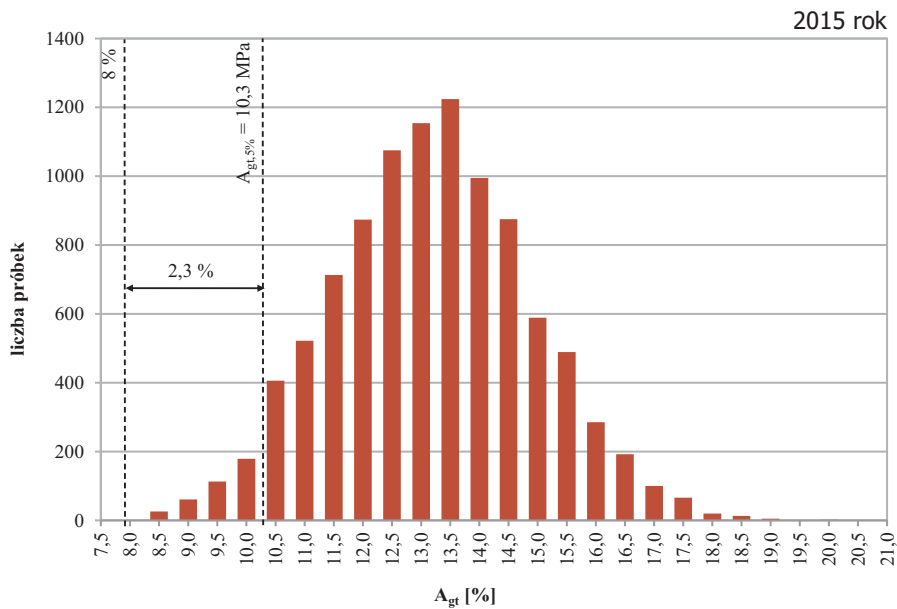


Rys. 3. Histogramy dla granicy plastyczności, uzyskane na podstawie wyników zakładowej kontroli produkcji prętów o średnicach 10-32 mm ze stali zbrojeniowej EPSTAL, w ciągu kolejno: 2015, 2016, 2017 i 2018 roku.

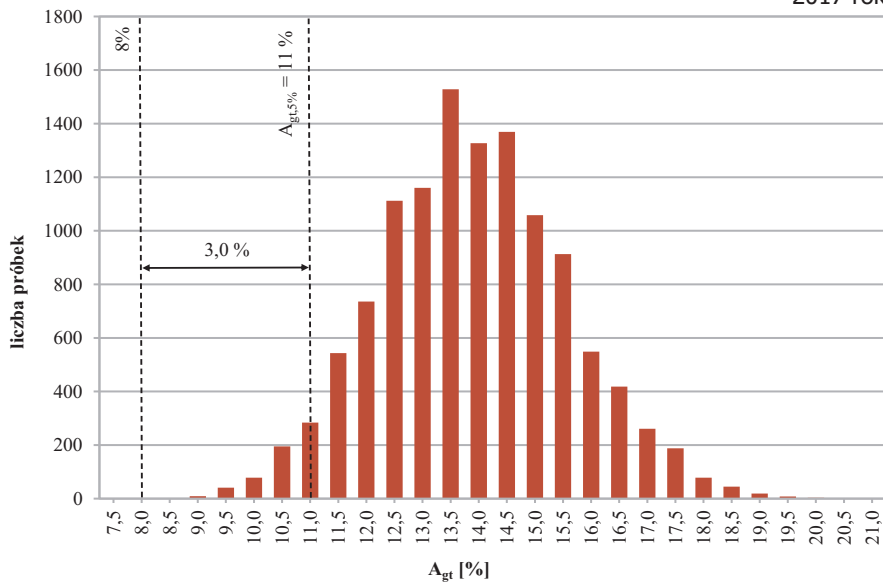




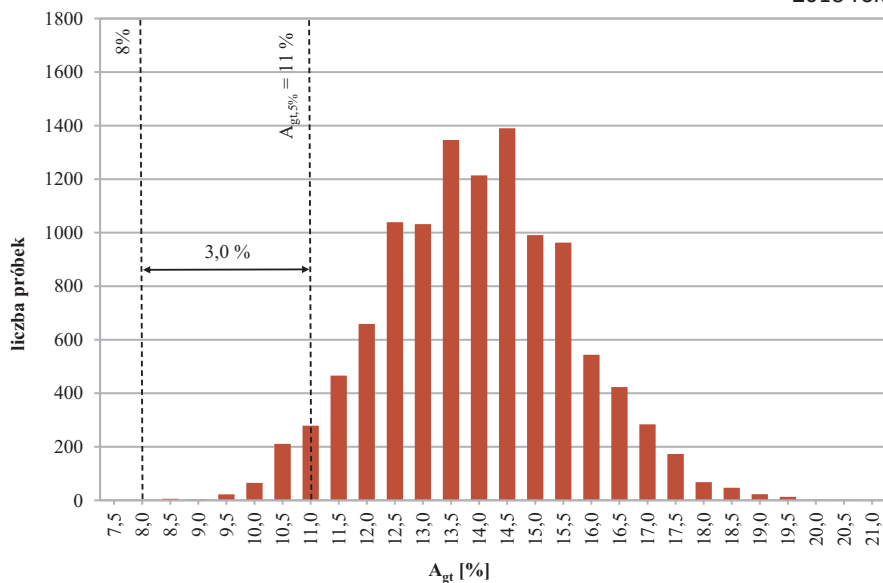
Rys. 4. Histogramy dla wytrzymałości na rozciąganie, uzyskane na podstawie wyników zakładowej kontroli produkcji prętów o średnicach 10-32 mm ze stali zbrojeniowej EPSTAL, w ciągu kolejno: 2015, 2016, 2017 i 2018 roku.



2017 rok



2018 rok



Rys. 5. Histogramy dla wydłużenia pod największym obciążeniem, uzyskane na podstawie wyników zakładowej kontroli produkcji prętów o średnicach 10-32 mm ze stali zbrojeniowej EPSTAL, w ciągu kolejno: 2015, 2016, 2017 i 2018 roku.

Tablica 2. Eksperymentalne wartości parametrów liczbowych histogramów granicy plastyczności dla prętów o różnych średnicach i zbiorczo dla wszystkich średnic.

	Średnica [mm]	Liczba próbek	$R_{e,śr}$ [MPa]	S [MPa]	v [%]	$R_{e,5\%}$ [MPa]	$R_{e,min}$ [MPa]	$R_{e,max}$ [MPa]
2015 rok	10	1229	537	16,991	3,16	510	500	612
	12	2586	539	13,69	2,54	518	500	607
	16	2074	541	11,413	2,11	522	501	603
	20	1892	543	10,138	1,86	526	515	573
	25	1329	550	14,083	2,56	528	509	595
	28	345	563	13,225	2,35	543	537	609
	32	524	557	13,908	2,5	535	519	597
	10-32	9979	543	14,588	2,68	520	500	612
2016 rok	10	1836	543	14,175	2,61	521	500	608
	12	3537	540	13,328	2,47	520	500	608
	16	2124	545	11,397	2,09	527	513	581
	20	1777	539	11,858	2,2	519	503	574
	25	1405	552	13,568	2,46	531	510	598
	28	338	547	13,745	2,51	524	504	593
	32	446	557	11,815	2,12	536	525	586
	10-32	11570	543	14,175	2,61	521	500	608
2017 rok	10	1776	539	15,478	2,87	514	500	598
	12	3870	537	13,669	2,54	517	502	596
	16	2356	540	9,677	1,79	525	502	590
	20	1712	540	12,134	2,25	521	505	597
	25	1184	550	9,691	1,76	534	518	589
	28	260	557	9,316	1,67	542	536	599
	32	603	553	15,081	2,73	528	505	591
	10-32	11924	541	13,68	2,53	519	500	599
2018 rok	10	1023	538	15,442	2,87	515	502	599
	12	2076	537	13,641	2,54	515	502	587
	16	2725	536	9,723	1,81	520	508	581
	20	2345	539	11,21	2,08	521	502	580
	25	1960	547	10,575	1,93	530	510	592
	28	339	548	13,661	2,49	523	506	585
	32	547	552	11,948	2,16	533	520	596
	10-32	11270	540	12,783	2,37	520	502	599

Wnioski

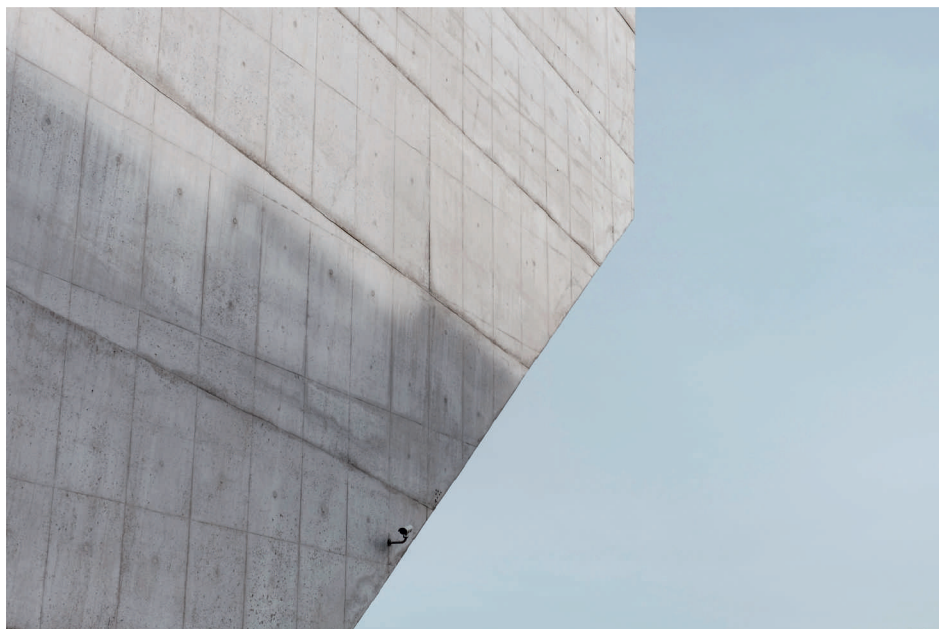
Producenci stali EPSTAL wykonują badania próbek prętów stalowych na rozciąganie tysiące razy w ciągu jednego roku (kilkaset razy dla niektórych średnic) w ramach zakładowej kontroli produkcji. Są to badania wielokrotne powtarzane w tych samych warunkach, dające różne wyniki. Istnieje więc pełna podstawa do probabilistycznego opisu parametrów mechanicznych prętów stali EPSTAL, który przedstawiono w niniejszej publikacji. Na podstawie statystycznego opracowania danych dotyczących tych parametrów z ostatnich czterech lat, tj. 2015, 2016, 2017 i 2018 roku, sformułowano następujące wnioski:

1. Zjawisko rozciągania próbek stali EPSTAL można opisać jednowymiarowym niestacjonarnym procesem stochastycznym $\sigma(\epsilon)$. Wielkości mechaniczne prętów stalowych, tj.: granica plastyczności, wytrzymałość na rozciąganie i wydłużenie pod największym obciążeniem, są jednowymiarowymi zmiennymi losowymi, dla których zbudowano histogramy pokazane na rysunkach 3-5. Obliczono estymatory parametrów liczbowych tych wielkości, w tablicy 2 zestawiono wyniki tych obliczeń dla granicy plastyczności.
2. Współczynniki zmienności granicy plastyczności prętów o średnicach od 10 do 32 mm, produkowanych w latach 2015-2018, przyjęły wartości w następujących przedziałach: 1,86-3,16% w 2015 roku; 2,09-2,61% w 2016 roku; 1,67-2,87% w 2017 roku; 1,81-2,87% w 2018 roku. Są to wartości małe, tzn. rozrzut granicy plastyczności jest niewielki. Produkowana stal jest bardzo dobrej jakości.
3. Doświadczalne wartości charakterystyczne granicy plastyczności, tj. wartości $R_{e,5\%l}$ są zawarte w następujących przedziałach: 510-543 MPa w 2015 roku; 519-536 MPa w 2016 roku; 514-542 MPa w 2017 roku; 515-533 MPa w 2018 roku. Wymagana normowo i deklarowana obecnie przez producentów wartość charakterystyczna granicy plastyczności w wysokości 500 MPa jest zatem dużo niższa, niż faktyczne wartości wynikające z procesu produkcji. Różnice te wahają się od 2% do nawet 8,6%. Można zatem stwierdzić, że produkowany materiał spełnia wymagania normowe z dużym marginesem bezpieczeństwa.



Bibliografia

- [1] PN-H-93220:2018-02 „Stal do zbrojenia betonu – Spajalna stal zbrojeniowa B500SP – Pręty i walcówka żebrowana”.
- [2] PN-EN 10080:2007 „Stal do zbrojenia betonu – Spajalna stal zbrojeniowa – Postanowienia ogólne”.
- [3] PN-EN 1992-1-1:2008: „Eurokod 2 – Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków”.
- [4] PN-B-03264:2002 „Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone – Obliczenia statyczne i projektowanie”.
- [5] PN-S 10042:1991 „Obiekty mostowe – Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone – Projektowanie”.
- [6] PN-EN ISO 6892-1:2016-09 „Metale – Próba rozciągania – Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej”.
- [7] PN-EN 1990:2004 „Eurokod – Podstawy projektowania konstrukcji”.



Publikacje



Najważniejsze cechy materiałowe stali zbrojeniowej EPSTAL o wysokiej ciągliwości

według nowej normy PN-H-93229:2018-02



Badania zachowania się połączeń płyta-słup zbrojonych stali EPSTAL o wysokiej ciągliwości w stadium awaryjnym wywołanym przecięciem

Połączenia zbrojone według Model Code 2010

Autorzy:
Barbara WIECZOREK
Miroslaw WIECZOREK
Włodzisław STARSZAKI

Pracownia:
Centrum Promocji Jakości Stali

Biuletyn Techniczny nr 3



Badania zachowania się krawędziowych połączeń płyta-słup zbrojonych stali EPSTAL o wysokiej ciągliwości w stadium awaryjnym wywołanym przecięciem

Autorzy:
Barbara WIECZOREK
Miroslaw WIECZOREK
Włodzisław STARSZAKI

Pracownia:
Centrum Promocji Jakości Stali

Biuletyn Techniczny nr 8



Badania zachowania się płyty żelbetonowej zbrojonej stali EPSTAL o wysokiej ciągliwości w sytuacji awaryjnej wywołanej przecięciem

Autorzy:
Miroslaw WIECZOREK
Barbara WIECZOREK
Włodzisław STARSZAKI

Pracownia:
Centrum Promocji Jakości Stali

Biuletyn Techniczny nr 7

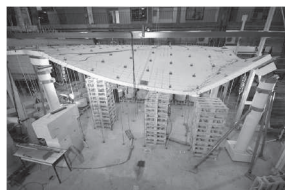


Restrukcja płytowo-słupowa. Zabezpieczenia przeciwko katastrofie postępowej

Autorzy:
Włodzisław STARSZAKI
Barbara WIECZOREK
Miroslaw WIECZOREK

Pracownia:
Centrum Promocji Jakości Stali

Biuletyn Techniczny nr 6

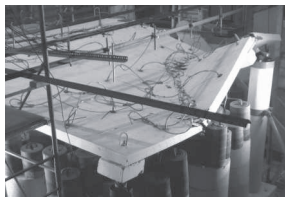


Badania zachowania się płyty żelbetonowej zbrojonej stali EPSTAL o wysokiej ciągliwości w sytuacji awaryjnej wywołanej przecięciem podłogi bez rozwarstwienia

Autorzy:
Barbara WIECZOREK
Miroslaw WIECZOREK
Włodzisław STARSZAKI

Pracownia:
Centrum Promocji Jakości Stali

Biuletyn Techniczny nr 5



Badania zachowania się narożnego fragmentu monolitycznego ostrza płytowo-słupowego zbrojonego stali EPSTAL o wysokiej ciągliwości w sytuacji awaryjnej wywołanej ściśnięciem podpory

Autorzy:
Miroslaw WIECZOREK
Włodzisław STARSZAKI

Pracownia:
Centrum Promocji Jakości Stali

Biuletyn Techniczny nr 4



Badania zakotwień strzemien wykonanych ze stali o wysokiej ciągliwości

Autorzy:
Andrzej Kopycki
Włodzisław STARSZAKI

Pracownia:
Centrum Promocji Jakości Stali

Biuletyn Techniczny nr 3

Zobacz
wszystkie
publikacje:



Tablice EPSTAL

Gatunek stali	Średnica nominalna	Nominalna powierzchnia przekroju poprzecznego	Masa nominalna 1 m [*]
	[mm]	[mm ²]	[kg/m]
B500SP	8	50,30	0,40
	10	78,50	0,62
	12	113,00	0,89
	14	153,94	1,21
	16	201,00	1,58
	20	314,00	2,47
	25	491,00	3,85
	28	615,75	4,83
	32	804,00	6,31
	40	1256,64	9,86

Parametry wytrzymałościowe		
Parametr	Opis	Wartość
f_{yk}	Charakterystyczna granica plastyczności	≥ 500 [MPa]
f_{tk}	Charakterystyczna wytrzymałość na rozciąganie	≥ 575 [MPa]
f_{tk}/f_{yk}	Stosunek wytrzymałości na rozciąganie do granicy plastyczności	1,15 ÷ 1,35 [-]
ϵ_{uk}	Wydłużenie próbki pod maksymalnym obciążeniem	≥ 8 [%]

* Masa obliczona na podstawie ciężaru objętościowego stali 7850 kg/m³



www.epstal.pl

Centrum Promocji Jakości Stali

ul. rtm. Witolda Pileckiego 67

02-781 Warszawa

Tel.: +48 22 252 67 03

E-mail: biuro@cpjs.pl