

# ANALIZA PORÓWNAWCZA STOPNI WYKORZYSTANIA NOŚNOŚCI I BEZPIECZEŃSTWA HALI STALOWEJ

Agnieszka JABŁOŃSKA-KRYSIEWICZ\*, Elżbieta SAPIESZKO

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok

**Streszczenie:** Przedstawiono porównanie stopni wykorzystania nośności oraz oceny bezpieczeństwa elementów stalowej hali. Nośność elementów wyznaczono na podstawie norm PN-90/B-03200 i PN-EN 1993-1-1. Analizę przeprowadzono dla przemysłowej hali stalowej z transportem podpartym. Układ nośny hali stanowią jednonawowe ramy, w których słupy połączone są przegubowo z dźwigarem kratowym i sztywno z fundamentem. Ekstremalne wartości sił w głównych elementach konstrukcji (dźwigar kratowy, belka podsuwnicowa, słupy) wyznaczono w programie Autodesk Robot Structural Professional 2012. W celu miarodajnego porównania wyników analizy statyczno-wytrzymałościowej wprowadzono stopnie wykorzystania nośności elementów zwymiarowanej zgodnie z normami PN-B i PN-EN. Zastosowano regresję liniową do oceny trendu i rozrzutu wyników oraz wyznaczono współczynnik korelacji.

*Słowa kluczowe:* stal, hala, konstrukcja, wymiarowanie, stopnie wykorzystania nośności.

## 1. Wprowadzenie

Na prawidłowe zaprojektowanie konstrukcji obiektu budowlanego składa się szereg czynników takich jak: opracowanie założeń techniczno-materiałowych, właściwy dobór schematu statycznego konstrukcji, określenie wartości obciążeń oraz ich kombinacji, wyznaczenie sił wewnętrznych, przemieszczeń i odkształceń oraz wymiarowanie elementów oraz połączeń. Procedura projektowa powinna być oparta na wiedzy inżynierskiej i zasadach zawartych w przepisach prawa budowlanego, normach i literaturze technicznej.

Od kilku lat normy nie są obowiązkowe do stosowania zgodnie z ustawą o normalizacji. Według wymagań technicznych warunki bezpieczeństwa konstrukcji uznaje się za spełnione, jeżeli konstrukcja odpowiada Polskim Normom dotyczącym projektowania i obliczania konstrukcji (Rawska-Skotniczy, 2013). W tej sytuacji projektant opierając się na zasadach w nich zawartych jest w stanie udowodnić, że właściwie zaprojektował obiekt budowlany. W sytuacji współistnienia na rynku norm PN-B, wycofanych z oficjalnego spisu norm, oraz norm europejskich PN-EN, implementowanych na rynek polski, uznawanych za bardziej nowoczesne, powstaje pytanie, jaka jest różnica w poziomie bezpieczeństwa konstrukcji i czy istnieje wzajemna korelacja współczynników wykorzystania nośności.

W obu przypadkach projektowania konstrukcji stalowych według normy PN-90/B-03200 *Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie* i Eurokodu 3 *Projektowanie konstrukcji stalowych* podstawą

wymiarowania elementów pozostaje niezmiennie metoda stanów granicznych. Pierwszą zauważalną różnicą formalną jest zmiana objętości norm. Na Eurokod 3 składa się 20 norm liczących po kilkadziesiąt stron. Do najważniejszych zmian o charakterze merytorycznym należy zaliczyć zmianę sposobu wyznaczania efektów oddziaływań na konstrukcję oraz określania nośności konstrukcji. W Eurokodzie 0 *Podstawy projektowania* oraz w Eurokodzie 1 *Oddziaływania na konstrukcję* wprowadzono zwiększone wartości współczynników obciążenia, natomiast w przypadku obliczania nośności w Eurokodzie 3 zmniejszono wartość współczynnika materiałowego. Zmiany te w sposób istotny wpływają na wyniki analizy statyczno-wytrzymałościowej konstrukcji stalowych.

Celem niniejszej pracy jest porównanie stopni wykorzystania nośności elementów stalowej hali przemysłowej wyznaczonych na podstawie norm PN-90/B-03200 *Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie* i PN-EN 1993-1-1:2006 *Projektowanie konstrukcji stalowych - Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków* oraz oszacowanie zmian oceny bezpieczeństwa.

## 2. Przedmiot analizy

Przedmiotem analizy jest przemysłowa hala stalowa z transportem podpartym o wysokości 11,20 m, rozpiętości 22 m i długości 45 m. Podczas projektowania hali wykorzystano prace Biegusa (2003) oraz

\* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: a.krysiewicz@pb.edu.pl

Kucharczuka i Labochy (2012). Układ nośny hali stanowią jednonawowe ramy, w których słupy połączone są przegubowo z dźwigarem kratowym i sztywno z fundamentem (rys. 1). Hala składa się z 8 układów głównych rozstawionych co 6 m. W skrajnych polach ściany szczytowe odsunięte zostały od ram nośnych na odległość 1,25 m.

Zastosowano dźwigary kratowe dwutrapezowe o wysokości w kalenicy 2 m i wysokości podporowej 1,2 m o skratowaniu typu N. Konstrukcję dachu i pokrycia stanowią dwie warstwy papy termozgrzewalnej, wełna mineralna twarda o grubości 15 cm, paroizolacja oraz blacha trapezowa T55 o grubości 1,25 mm. Płatwie przyjęto z dwuteowników walcowanych IPE100 w rozstawie 2,75 m (w każdym węźle kratownicy). Słupy zaprojektowano jako pełnościenne dwustopniowe z częścią podsuwnicową z dwuteownika IPE500 i częścią nadsuwnicową z dwuteownika IPE400. Belkę podsuwnicową oparto na wsporniku wykonanym z IPE360 długości 0,9 m. Transport wewnętrzny stanowi suwnica jednohakowa o udźwigu 12,5 t i rozpiętości mostu suwnicowego 20 m. Belki podsuwnicowe zaprojektowano jako wolnopodparte jednoprzęsłowe, składające się z dwuteownika HEA450 i tężnika hamownego wykonanego z ceownika UPN160 i blachy bl.460×6. Ściany stanowią płyty warstwowe firmy Ruukki typu Metalplast Isotherm Plus z rdzeniem styropianowym o grubości 10 cm. Wszystkie elementy nośne zaprojektowano ze stali S235JR.

Obciążenia charakterystyczne hali wyznaczono na podstawie aktualnie obowiązujących norm polskich. Kombinacje obciążeń ustalono według wymagań normy polskiej PN-B oraz Eurokodów PN-EN. Do analizy przyjęto układ płaski, przedstawiony na rysunku 1. Ekstremalne wartości sił w głównych elementach

konstrukcji (dźwigar kratowy, belka podsuwnicowa, słup) wyznaczono w programie Autodesk Robot Structural Professional 2012. Zastosowano analizę I rzędu bez uwzględniania imperfekcji. Wszystkie elementy konstrukcji hali zostały tak dobrane, aby spełniały warunki SGN i SGU dla obu norm.

### 3. Analiza porównawcza

W celu miarodajnego porównania wyników analizy statyczno-wytrzymałościowej wprowadzono stopnie wykorzystania nośności elementów hali zdefiniowane jako:

– dla obliczeń według polskich norm PN-B

$$\eta_{\left(\frac{PN-B}{PN-B}\right)} = \frac{S_{PN-B}}{R_{PN-B}} \quad (1)$$

gdzie:  $\eta_{\left(\frac{PN-B}{PN-B}\right)}$  jest stopniem wykorzystania nośności

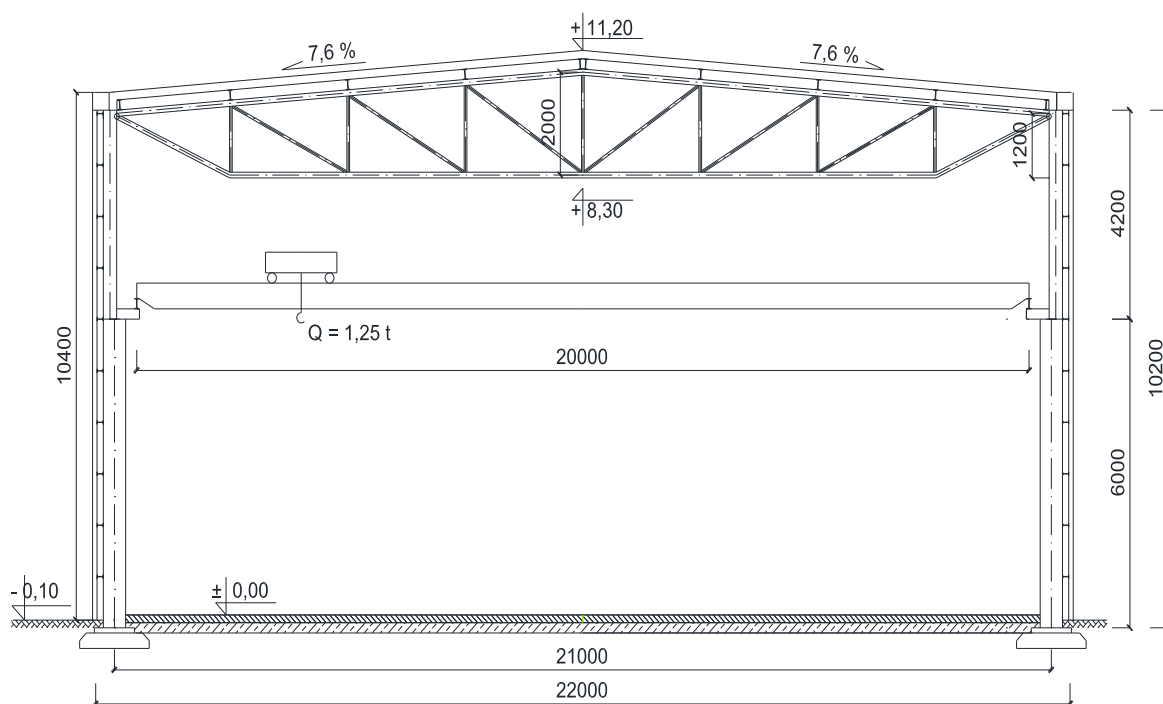
elementu obliczonego według normy PN-90/B-03200,  $S_{PN-B}$  jest największą siłą wewnętrzną działającą na dany element, a  $R_{PN-B}$  nośnością obliczeniową danego elementu.

– dla obliczeń według Eurokodu PN-EN

$$\eta_{\left(\frac{PN-EN}{PN-EN}\right)} = \frac{S_{PN-EN}}{R_{PN-EN}} \quad (2)$$

gdzie:  $\eta_{\left(\frac{PN-EN}{PN-EN}\right)}$  jest stopniem wykorzystania nośności

elementu obliczonego według normy PN-EN 1993-1-1,  $S_{PN-EN}$  jest największą siłą wewnętrzną działającą na dany element, a  $R_{PN-EN}$  nośnością obliczeniową danego elementu.



Rys. 1. Przekrój poprzeczny hali

Z uwagi na technologiczne uwarunkowanie doboru przekrojów poszczególnych elementów konstrukcji oraz nieliniowy sposób wyznaczania ich stopni wykorzystania nośności parametry  $\eta_{\left(\frac{PN-B}{PN-B}\right)}$  i  $\eta_{\left(\frac{PN-EN}{PN-EN}\right)}$  mają charakter losowy o pewnym rozrzucie. Tworzą one chmurę punktów, dla których może być zastosowana regresja liniowa do oceny trendu i rozrzutu wyników w następującej postaci:

$$\eta_{\left(\frac{PN-EN}{PN-EN}\right)} = a\eta_{\left(\frac{PN-B}{PN-B}\right)} + b \quad (3)$$

gdzie:  $a$  jest współczynnikiem kierunkowym prostej, a  $b$  współczynnikiem przesunięcia prostej regresji.

Jako miarę rozrzutu wyników przyjęto współczynnik korelacji  $R$ . Należy zaznaczyć, że dla analizowanej konstrukcji wartości współczynników  $\eta_{\left(\frac{PN-B}{PN-B}\right)}$  i  $\eta_{\left(\frac{PN-EN}{PN-EN}\right)}$  są mniejsze od 1.

#### 4. Wyniki analizy porównawczej

W tabelach 1, 2 i 3 przedstawiono zestawienia uzyskanych wartości współczynników wykorzystania nośności  $\eta_{\left(\frac{PN-B}{PN-B}\right)}$  i  $\eta_{\left(\frac{PN-EN}{PN-EN}\right)}$  podanych w procentach dla głównych elementów konstrukcyjnych hali: belki podsuwnicowej, dwustopniowego słupa ze wspornikiem oraz dźwigara kratowego. Wartości współczynników dla belki podsuwnicowej podano dla przekrojów w punktach charakterystycznych dla odpowiednich obciążeń wymaganych przez normy PN-90/B-03200, PN-EN 1993-1-1 i PN-EN 1993-1-6 *Projektowanie konstrukcji stalowych - Część 1-6: Wytrzymałość i stateczność konstrukcji powłokowych*. Dla słupa wartości współczynników obliczono dla części nadsuwnicowej, podsuwnicowej oraz wspornika dla maksymalnych wartości sił wewnętrznych, uzyskanych dla niekorzystnej kombinacji obciążeń.

Tab. 1. Zestawienie wartości współczynników wykorzystania nośności elementu dla belki podsuwnicowej

Element	$\eta_{\left(\frac{PN-B}{PN-B}\right)}$	$\eta_{\left(\frac{PN-EN}{PN-EN}\right)}$
Pas górny (przekrój złożony) – zginanie z siłą podłużną	74%	56%
Pas dolny (przekrój złożony) – zginanie	58%	47%
Tężnik hamowny – zginanie	20%	22%
Przekrój złożony – ścinanie względem osi y ceownika	21 %	13%
Przekrój złożony – ścinanie względem osi z ceownika	-	1,4%
Ceownik – ścinanie	-	1,2%
Ceownik – zginanie	17%	12%

Tab. 2. Zestawienie wartości współczynników wykorzystania nośności dla elementów składowych słupa

Element		$\eta_{\left(\frac{PN-B}{PN-B}\right)}$	$\eta_{\left(\frac{PN-EN}{PN-EN}\right)}$
Część nadsuwnicowa	ściskanie ze zginaniem	33%	89%
	ściskanie	33%	19%
	ściananie	5%	2%
	zginanie	30%	39%
Część podsuwnicowa	ściskanie ze zginaniem	16%	36%, 43%
	ściskanie	22%	11%
	ściananie	2%	2%
	zginanie	12%	22%
Wspornik	ściskanie ze zginaniem	63%	46%, 76%
	ściskanie	2%	2%
	ściananie	60%	75%
	zginanie	64%	62%

Tab. 3. Zestawienie wartości współczynników wykorzystania nośności dla elementów dźwigara kratowego

Element	$\eta_{\left(\frac{PN-B}{PN-B}\right)}$	$\eta_{\left(\frac{PN-EN}{PN-EN}\right)}$
Pas górny – ściskanie	66%	85%
Pas dolny – rozciąganie ze zginaniem	60%	75%
Słupki (2 szt.) – ściskanie	60%	70%
Krzyżulce (2 szt.) – rozciąganie	69%	86%
Słupki (2 szt.) – ściskanie	35%	41%
Krzyżulce (2 szt.) – rozciąganie	26%	33%
Słupki (2 szt.) – ściskanie	17%	19%
Krzyżulce (2 szt.) – ściskanie	57%	63%
Słupki – rozciąganie	12%	16%

Na podstawie analizy wyników obliczeń można stwierdzić, że stopnie wykorzystania nośności elementu obliczone według Eurokodów są znacznie większe w porównaniu ze stopniami wykorzystania nośności uzyskanymi z wymiarowania według norm PN-B dla części składowych słupa poddanych ściskaniu ze zginaniem. Wartość  $\eta_{\left(\frac{PN-EN}{PN-EN}\right)}$  wzrasta do wartości 2,7  $\eta_{\left(\frac{PN-B}{PN-B}\right)}$  w przypadku części podsuwnicowej i nadsuwnicowej. Dla elementów dźwigara kratowego poddanych rozciąganiu lub ściskaniu różnice w wartościach współczynników wykorzystania nośności są stosunkowo mniejsze i wynoszą do 27% zwiększenia w przypadku projektowania według Eurokodów. W przypadku belki podsuwnicowej występuje sytuacja odwrotna, ponieważ wartości  $\eta_{\left(\frac{PN-EN}{PN-EN}\right)}$  są mniejsze od wartości  $\eta_{\left(\frac{PN-B}{PN-B}\right)}$  o 23% w przypadku sprawdzania

warunku zginania pasa dolnego, a 61% przy sprawdzaniu nośności pasa górnego. Wyjątek stanowi współczynnik wykorzystania nośności określony dla tężnika hamownego poddanego zginaniu, dla którego  $\eta_{\left(\frac{PN-B}{PN-EN}\right)}$  jest większy od  $\eta_{\left(\frac{PN-B}{PN-B}\right)}$ .

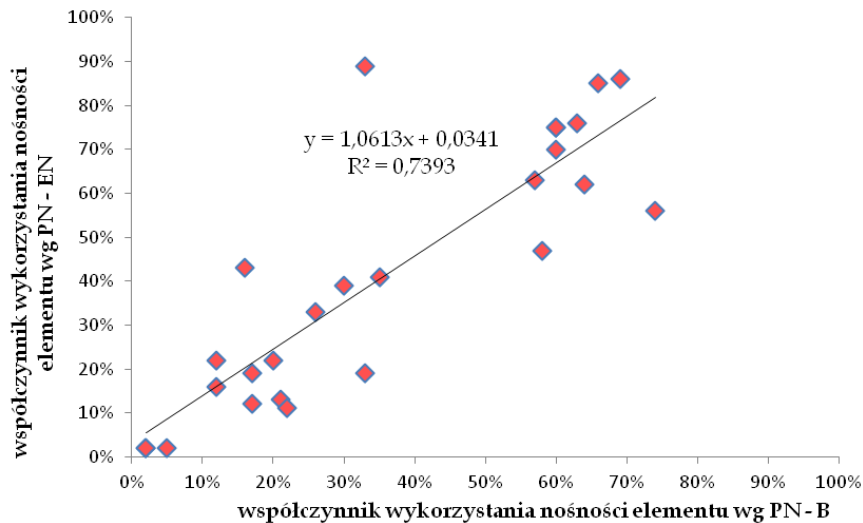
Na rysunku 2 przedstawiono wyniki obliczeń stopnia wykorzystania nośności według wzoru 1 (oś X) i wzoru 2 (oś Y) wraz z równaniem prostej regresji (wzór 3) i określonym współczynnikiem korelacji dla wszystkich analizowanych elementów konstrukcji, zaś na rysunku 3, te same wielkości zestawiono tylko dla prętów dźwigara kratowego.

Analizując wyniki współczynników nośności elementów oraz wykresy prostych regresji można zauważyć, że wymiarowanie według norm PN-B i PN-EN jest ze sobą skorelowane. Jest to skutek przyjęcia za podstawę obliczeń tej samej metody stanów granicznych. Otrzymana wartość  $R^2 = 0,9854$  dla elementów kratownicy świadczy o bardzo silnym związku korelacyjnym obu sposobów wymiarowania według

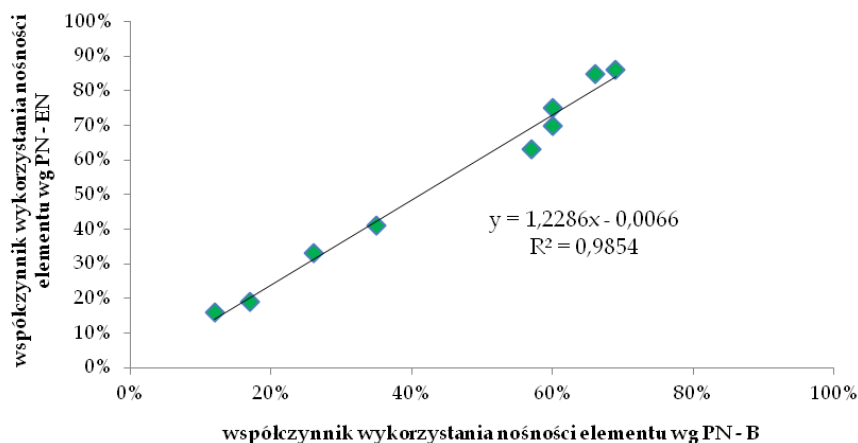
polskich norm PN-B i obowiązujących Eurokodów PN-EN. W przypadku rozpatrywania wyników otrzymanych dla wszystkich wymiarowanych elementów konstrukcji hali należy stwierdzić, że związek korelacyjny współczynników  $\eta_{\left(\frac{PN-B}{PN-B}\right)}$  i  $\eta_{\left(\frac{PN-EN}{PN-EN}\right)}$  jest już tylko silny ( $R^2 = 0,7393$ ).

Teoretycznie współczynnik  $b$  prostej regresji powinien dążyć do zera, ponieważ w przypadku konstrukcji nieobciążonej współczynniki wykorzystania nośności przyjmują wartość równą 0. Analizując znormalizowaną przestrzeń  $\left(\eta_{\left(\frac{PN-B}{PN-B}\right)}, \eta_{\left(\frac{PN-EN}{PN-EN}\right)}\right)$  można stwierdzić,

że współczynnik  $b$  jest składnikiem poprawkowym parametru  $a$ . Wielkość  $100(a - 1)$  można traktować jako miarę zmiany stopnia wykorzystania nośności elementu obliczonego według PN-B przy przejściu na obliczenia według PN-EN. Paczkowski i Pełka-Sawenko (2010) wykazali, że zwiększenie wartości współczynników przy wymiarowaniu wybranych elementów hali (płatwie



Rys. 2. Stopnie wykorzystania nośności elementów wraz z równaniem prostej regresji i współczynnikiem korelacji – wszystkie analizowane elementy



Rys. 3. Stopnie wykorzystania nośności elementów wraz z równaniem prostej regresji i współczynnikiem korelacji – pręty dźwigara kratowego

kratowe, słupy oraz stężenia) według Eurokodu osiąga wartość średnią 1,6% w porównaniu do współczynników uzyskanych według norm PN-B. Podobne proporcje zmian uzyskał Kowalski i Nowicki (2007). Przeprowadzona powyżej analiza potwierdza zwiększenie wartości  $\eta_{\left(\frac{PN-EN}{PN-EN}\right)}$  w porównaniu do  $\eta_{\left(\frac{PN-B}{PN-B}\right)}$  dla słupów, belek oraz elementów dźwigara kratowego. Jednak otrzymana różnica wyniosła średnio 6%. Jest to prawdopodobnie spowodowane przyjęciem do obliczeń wydzielonego układu płaskiego, podczas gdy w pracy Paczkowskiego i Pełki-Sawenka (2010) analizowano układ przestrzenny hali.

## 5. Podsumowanie

Przeprowadzone obliczenia współczynników wykorzystania nośności według norm polskich PN-B i norm europejskich PN-EN, implementowanych na rynek polski, były podstawą do oceny bezpieczeństwa konstrukcji. W większości przypadków wystąpił wzrost wartości współczynników uzyskanych dla wybranych elementów przy wymiarowaniu według Eurokodów, a więc  $\eta_{\left(\frac{PN-EN}{PN-EN}\right)} > \eta_{\left(\frac{PN-B}{PN-B}\right)}$ . Wyjątek stanowi belka podsuwnicowa, dla której otrzymano odwrotną zależność pomiędzy współczynnikami wykorzystania nośności elementu.

Uzyskane wartości parametrów regresji pozwalają na ocenę trendów występujących w przypadku obliczeń stopnia wykorzystania nośności według norm PN-B i PN-EN. Na ich podstawie zauważono, że wymiarowanie elementów wyizolowanego układu płaskiego hali powoduje wzrost wartości średniej różnicy współczynników do 6% w porównaniu do wymiarowania przestrzennego układu hali, dla której uzyskano wartość różnicy równą 1,6%. Można zatem stwierdzić, że projektowanie według norm europejskich Eurokodów jest na ogół bezpieczniejsze niż według norm polskich. Należy jednak mieć świadomość, że zaprojektowana konstrukcja zgodnie z zasadami PN-EN najprawdopodobniej będzie cięższa od tej, która spełniałaby wymagania SGN według normy PN-B, z powodu konieczności przyjęcia kształtowników o wyższych parametrach wytrzymałościowych. Konsekwencją wzrostu

ciężaru konstrukcji jest wzrost kosztu obiektu, który to wpływa na decyzje potencjalnych inwestorów.

## Literatura

- Biegus A. (2003). *Stalowe budynki halowe*. Arkady, Warszawa.
- Kowalski D., Nowicki M. (2007). Ocena wskaźnika wykorzystania nośności wybranych elementów stalowej wiaty według PN-90/B-03200 i PN-EN 1993-1-1. *Inżynieria i Budownictwo*, 11/2007, 573-575.
- Kucharczuk W., Labocha S. (2012). Hale o konstrukcji stalowej. Poradnik Projektanta. *Polskie Wydawnictwo Techniczne*, Rzeszów.
- Paczkowski W., Pełka-Sawenka A. (2010). Porównanie wskaźników nośności elementów konstrukcji przykładowej hali stalowej według PN-90/B-03200 oraz PN-EN 1993-1-1. *Inżynieria i Budownictwo*, 1/2010, 27-29.
- Rawska-Skotniczy A. (2013). Obciążenia budynków i konstrukcji budowlanych według Eurokodów. *Wydawnictwo Naukowe PWN*, Warszawa.

### THE COMPARATIVE ANALYSIS OF CARRYING CAPACITY FOR CONSTRUCTION ELEMENTS OF STEEL HALL ACCORDING TO PN-90/B-03200 AND PN-EN 1993-1-1

**Abstract:** The aim of this paper was to compare rates of utilization of capacity of steel structure elements calculated according to the Polish Standard PN-90/B-03200 and Eurocodes PN-EN 1993-1-1. The elements of steel hall were calculated with the procedures ULS and SLS and the rates of utilization of capacity of them were placed in tabular. Based on this calculation the regression curves for all of analysed elements and only for truss were done. It was proved that the rates of utilization of capacity calculated according to Eurocode 3 increased in compare to the rates calculated according to Polish Standard. This increasing was caused by changes in values of partial safety factors of actions in EC0 and EC1. That can lead to more safety designing of steel structure but more expensive too.

Artykuł opracowano w Politechnice Białostockiej w ramach realizacji pracy statutowej S/WBiŚ/2/2012.