

Zbigniew Kowal*

O przyczynach zmniejszenia niezawodności stalowych konstrukcji wielkopowierzchniowych hal

On the causes of lower reliability of steel structures of large surface halls

1. Wprowadzenie

W ostatnich latach nasiliły się remonty po awariach i katastrofach konstrukcji stalowych wielko powierzchniowych hal o różnym przeznaczeniu. W orzeczeniach przyczyn wskazywano na błędy w projektowaniu i wykonawstwie konstrukcji. Do klasycznych błędów grubych zalicza się:

- 1) obliczanie konstrukcji rzekomo kratownicowymi metodami właściwymi dla kratownic bez badania geometrycznej niezmienności systemu konstrukcyjnego w założeniu przegubowych połączeń prętów w węzłach,
- 2) wykonywanie połączeń z węzłami o nośności mniejszej od nośności łączonych prętów,
- 3) błędy w przekształceniach za pomocą stężeń konstrukcji płaskich w przestrzenne.

Jednakże w pracy zajęto się wyjaśnieniem niedostrzeganej tendencji zmniejszania się globalnego bezpieczeństwa konstrukcji z warunku eksploatacji i nośności konstrukcji wskutek zmniejszania się stosunku obciążenia P_w konstrukcji masą własną w stosunku do obciążenia zmiennego P_z . Dotyczy to zwłaszcza konstrukcji stalowych wielkopowierzchniowych hal, w których wprowadzono lekką trójwarstwową, z rdzeniem termoizolacyjnym, obudowę ścienną i dachową. Według [13] ciężar słabo ocieplonych pokryć płyt dachowych w nachyleniu 10% wynosił od 70 do 300 kg/m². W tym czasie rzadko stosowano pokrycia o mniejszym nachyleniu. W ostatnim trzydziestoleciu obciążenie konstrukcji hal dachowymi płytami trójwarstwowymi

1. Introduction

In the last years the number of repairs after breakdowns and all sorts of collapses of steel structures of large surface halls of various destination has grown. In the assessment of the cause of the above-mentioned it was shown that there had occurred mistakes in designing and in the execution of the constructions. Amongst typical heavy mistakes are as follows:

- 1) calculation of supposedly truss constructions had been made with the use of methods specific for truss without checking geometrical invariability of the constructional system, assuming articulated joints of rods in the nodes,
- 2) executing the connections with nodes of lower carrying capacity than the carrying capacity of the rods connected,
- 3) mistakes in transformation of flat constructions into spatial ones with the use of bracing.

However, in this paper we shall focus upon the explanation of non perceived tendency of decreasing in total safety of the construction in the condition of exploitation and in the carrying capacity of the construction as a result of decreasing ratio of the load of the construction with its own weight P_w to the changing load P_z . This concerns especially the steel constructions of large surface halls which have been provided with light wall and roof casing of three-layer boards with thermo-insulating core. According to [13] the weight of lightly thermo-insulated coverage of roof plates with inclination of 10% was equal from 70 to 300 kg/m². At the time it was rare that the applied roof coverage inclination was lower. In the last period of thirty years the load of the hall con-

mi zastosowanymi w miejsce, na przykład, cienkościennych żelbetonowych płyt panwiowych o masie około 120kg/m^2 zmniejszyło się rzędu 9 razy przy niezmiennych normowych [14, 15] wymaganiach bezpieczeństwa konstrukcji. Obecnie np. ciepłe płyty ciągłe trójwarstwowe z rdzeniem poliuretanowym [18] (2008) grubości 100 mm mają masę 13kg/m^2 . Łubiński [10] wyraźnie dzieli pokrycia na lekkie i ciężkie dostrzegając różnice konstrukcyjne, lecz bez konsekwencji w szacowaniu bezpieczeństwa konstrukcji.

Poglądy na bezpieczeństwo konstrukcji metalowych hal zostały ustalone w czasie królowania ciężkiej obudowy. Oczekiwany zapas bezpieczeństwa zmniejszył się wydatnie wraz ze zmniejszaniem się obciążenia masą własną P_w konstrukcji w stosunku do obciążenia śniegiem P_z . Kolejną przyczyną zmniejszania się niezawodności konstrukcji stały się zmiany właściwości fizycznych płyt obudowy. Wprowadzenie „ciepłych” płyt lekkiej obudowy wpłynęło na zwiększenie obciążenia konstrukcji śniegiem, stwarzając warunki do konsolidacji śniegu zwłaszcza na dachach o małym nachyleniu połaci. Utrudniony spływ wody z połaci powoduje jej wsiąkanie w śnieg i zamarzanie przy ciepłej obudowie. Aktualnie to zagadnienie stało się przedmiotem rozważań zmierzających do udoskonalenia norm obciążenia śniegiem [16].

Niezamierzone zmniejszenie bezpieczeństwa konstrukcji dotyczy przypadków większego rozproszenia losowego obciążenia zmiennego P_z aniżeli obciążenia stałego P_w . To obiektywne zjawisko dotyczy szczególnie konstrukcji stalowych i na razie nie znalazło swojego wyrazu w aktualizacji norm, nie tylko w Polsce lecz również w świecie. Prawdziwość powyższej tezy o mniejszym bezpieczeństwie hal z lekką obudową aniżeli hal z ciężką obudową można udowodnić za pomocą rachunku prawdopodobieństwa posługując się algebrą kwantyli. Sposób dowodu wynika stąd, że zarówno nośność konstrukcji jak i obciążenia są wielkościami losowymi [7].

2. Globalna nośność a udźwig konstrukcji mierzony zapasem nośności na obciążenie zmienne

Globalną nośność i bezpieczeństwo konstrukcji odpowiadające obliczeniowej nośności normowej w przypadku normalnego rozkładu prawdopodobieństwa można wyznaczyć za pomocą algebry kwantyli [4, 6, 7]. Kwantyl globalnej nośności N_k konstrukcji wyznacza się ze wzoru:

structions with roof three-layer plates applied instead of, for example, thin-wall reinforced concrete panel plates of the weight about 120 kg/m^2 got lower by about 9 times, whereas the standard controlled safety requirements for the construction have not been changed [14, 15]. At present e.g. thermo-insulated three-layer continuous plates with polyurethane core [18] of 100 mm in thickness have the weight 13 kg/m^2 . Łubiński [10] has clearly divided the coverage onto light and heavy, noticing the constructional differences but without any consequence in estimating the construction safety.

Opinions on the construction safety of the metal construction halls were settled while the heavy casing was dominating. The expected safety margin got considerably smaller with reducing the load caused by construction' own weight P_w in relation to the load exerted by snow P_z . The changes of the physical properties of the casing plates become another cause of decreasing in the reliability of the construction. The introduction of the 'warm' plates of the light casing influenced upon enlargement of the load of the construction caused by snow, by creating conditions for consolidation of the snow layer, especially on the roofs of small inclination of the surface. The outflow of water from the roof surface is made difficult, which causes soaking the snow with water and freezing thereof on the warm casing. At present this question has become the object of considerations aimed at improvement of the standards of the snow caused load [16].

Unintentional decrease in the construction safety pertains rather to the cases of larger scattering of the random changing load P_z than the steady load P_w . This objective phenomenon relates particularly to steel constructions and so far has not been expressed in the actualization of standards, not only in Poland but also elsewhere in the world. The truth of the above mentioned proposition about lower safety of the halls with light casing in comparison to the halls with heavy casing can be proved mathematically with the help of the calculus of probability while using the quantile algebra. The way of mathematical proof stems from the fact, that both the carrying capacity of the construction and the loads are random magnitudes [7].

2. Global carrying capacity and construction lifting capacity as measured with the margin of carrying capacity under the changing load

Global carrying capacity and the construction safety corresponding to the normative computational carrying capacity in the case of normal distribution of the probability can be calculated using the quantile algebra [4, 6, 7]. The quantile of global carrying capacity N_k for a construction is calculated from the formula:

$$N_k = E(N) - t D(N), \quad (1)$$

gdzie: t – wskaźnik niezawodności (parametr pozwalający na wyznaczenie bezpieczeństwa wprost z tablic rozkładu normalnego), $E(N)$ – oczekiwana nośność konstrukcji, $D(N)$ – odchylenie standardowe nośności.

Należy nadmienić, że kwantyl nośności jest obiektywną miarą nośności i odpowiada normowej nośności obliczeniowej na założonym poziomie prawdopodobieństwa – poziomie niezawodności.

Kwantyl obciążenia P_k wyznacza się ze wzoru:

$$P_k = E(P) - tD(P), \quad (2)$$

gdzie: $E(P)$ – obciążenia oczekiwane, $D(P)$ – odchylenie standardowe obciążenia.

Biorąc pod uwagę przypadek, że obciążenie $P = P_w + P_z$ konstrukcji składa się z obciążenia stałego ciężarem własnym P_w i zmiennego np. śniegiem P_z , oszacowano odchylenie standardowe $D(P_w)$ masy konstrukcji w trybie projektowania lub inżynierii niezawodności.

Uwaga: inżynieria niezawodności zajmuje się badaniem zgodności bezpieczeństwa konstrukcji wybudowanej z niezawodnością prognozowaną w projekcie oraz przydatnością konstrukcji do remontu i wzmocnienia.

Obciążenie masą własną konstrukcji i obudowy daje się dobrze oszacować, a odchylenie $D(P_w)$ standardowe wynosi około $0,03E(P_w)$. Natomiast obciążenia zmienne [3, 4, 5] mają bardzo różne rozproszenia, przeważnie większe aniżeli obciążenia stałe.

Wartość własną w postaci kwantyla udźwigu N_{rk} konstrukcji mierzonego zapasem nośności konstrukcji na obciążenie zmienne (udźwig – zapas nośności konstrukcji na obciążenie zmienne) wyrażono wzorem:

$$N_{rk} = E(N) - E(P_w) - t\sqrt{[D^2(N) + D^2(P_w)]} = E(N_r) - tD(N_r), \quad (3)$$

gdzie: $E(N_r) = E(N) - E(P_w)$ – oczekiwany zapas nośności na udźwig, $D(N_r) = \sqrt{[D^2(N) + D^2(P_w)]}$ – odchylenie standardowe zapasu nośności na udźwig.

Obliczenie udźwigu konstrukcji jako zapasu nośności przewidzianego na obciążenie zmienne, pokazano w przykładzie 1.

Przykład 1. Obliczyć kwantyl N_k nośności globalnej oraz kwantyl N_{rk} udźwigu konstrukcji dla następujących danych:

1) oczekiwana nośność konstrukcji wynosi $E(N)$,

wherein: t – coefficient of reliability (parameter allowing to determine the safety directly from the tables of normal distribution), $E(N)$ – the expected carrying capacity of the construction, $D(N)$ – the standard deviation of the carrying capacity.

One should mention that the quantile of carrying capacity is an objective measure of the carrying capacity and corresponds to the normative computational carrying capacity at the assumed level of probability – level of reliability.

The Quantile of load P_k is calculated from the formula:

wherein: $E(P)$ – expected loads, $D(P)$ – the standard deviation of the load.

Let's take into consideration the case, when the load of the construction $P = P_w + P_z$ consists of a steady load caused by the construction's own weight P_w and a changing load e.g. snow P_z . Let's estimate standard deviation $D(P_w)$ of the weight of construction in the mode of designing or in the mode of reliability engineering.

Note: reliability engineering deals with investigation of the compatibility of the safety of the construction built with prognosed reliability at the stage of design and of the susceptibility of the construction to repair and strengthening.

The load by the construction's own weight and the casing can be well estimated and the standard deviation $D(P_w)$ is about $0.03E(P_w)$. However, the changing loads [3, 4, 5] have very varied scattering, in most cases larger than the steady loads.

Let's create the own value in the form of the quantile of lifting capacity N_{rk} of the construction, as measured by the margin of carrying capacity of the construction under a changing load (lifting capacity – margin of carrying capacity of the construction under a changing load):

wherein: $E(N_r) = E(N) - E(P_w)$ – the expected margin of carrying capacity for the lifting capacity, $D(N_r) = \sqrt{[D^2(N) + D^2(P_w)]}$ – standard deviation of the margin of carrying capacity for lifting capacity.

The calculation of the lifting capacity of the construction as the margin of carrying capacity provided for the changing load, has been shown in example 1.

Example 1. Calculate the quantile N_k of global carrying capacity and the quantile N_{rk} of lifting capacity of the construction for the following data:

1) the expected carrying capacity of the construction is equal to $E(N)$,

- 2) odchylenie standardowe nośności wynosi: $D(N) = 0,06E(N)$,
- 3) oczekiwany ciężar własny konstrukcji wynosi $E(P_w)$,
- 4) odchylenie standardowe obciążenia masą własną konstrukcji wraz z obudową wynosi $D(P_w) = 0,03E(P_w)$,
- 5) stosunek oczekiwanego obciążenia własnego do oczekiwanej nośności wynosi: $E(P_w)/E(N) = 0,5$.

Kwantyl N_k globalnej nośności konstrukcji na poziomie wskaźnika niezawodności $t = 3$ wynosi:

$$N_k = E(N) - 3D(N) = E(N)(1 - 3 \times 0,06) = 0,82E(N).$$

Odchylenie standardowe udźwigu konstrukcji w przykładzie wynosi:

$$D(N_r) = \sqrt{D^2(N) + D^2(P_w)} = [\sqrt{0,06^2 + 0,03^2} \times 0,5]E(N) = 0,06185E(N).$$

Kwantyl udźwigu konstrukcji o wskaźniku niezawodności $t = 3$ wynosi:

$$N_{rk} = E(N_r) - E(t) - tD(N_r) = 0,5E(N) - 3 \times 0,06185E(N) = 0,3145E(N).$$

Współczynnik zmienności $v_z = D(P_z)/E(P_z)$ obciążenia zmiennego (np. śniegiem) jest kilkakrotnie większy od obciążenia masą własną konstrukcji. Masę własną konstrukcji poddaje się kontroli brakarskiej, natomiast obciążenie śniegiem jest niezależne od masy konstrukcji.

Sedno zagadnienia leży w tym, że wykorzystanie wyżej obliczonego kwantyla N_{rk} zapasu nośności na obciążenie zmienne (na udźwig konstrukcji) zależy od współczynnika v_z zmienności obciążenia zmiennego: $v_z = D(P_z)/E(P_z)$.

3. Zapas nośności (bezpieczeństwa) konstrukcji poddanej obciążeniu zmiennemu

Zapaw Z losowej nośności konstrukcji stalowej pod obciążeniem zmiennym (śniegiem) rozumiany jako zabezpieczenie przed przeciążeniem konstrukcji wynosi:

$$Z = N - P_w - P_z. \quad (4)$$

Kwantyl Z_k zapasu nośności konstrukcji po obciążeniu zmiennym (śniegiem) wynosi:

$$Z_k = E(Z) - tD(Z), \quad (5)$$

gdzie: $E(Z) = E(N) - E(P_w) - E(P_z)$ – oczekiwany zapas nośności po obciążeniu śniegiem, $D(Z) = \sqrt{[D^2(N) + D^2(P_w) + D^2(P_z)]}$ – odchylenie standardowe zapasu nośności po obciążeniu śniegiem.

- 2) the standard deviation of carrying capacity is: $D(N) = 0.06E(N)$,
- 3) the expected construction's own weight is $E(P_w)$,
- 4) the standard deviation of the load of the construction's own weight together with the casing $D(P_w) = 0.03E(P_w)$,
- 5) the ratio of the expected construction's own load to the expected carrying capacity is: $E(P_w)/E(N) = 0.5$.

The quantile N_k of the global carrying capacity of the construction at the level of the reliability coefficient $t = 3$ is:

The standard deviation of the lifting capacity of the construction in the example is equal to

The quantile of the lifting capacity of the construction at the reliability coefficient $t = 3$ is:

The variability coefficient $v_z = D(P_z)/E(P_z)$ of the changing load (e.g. snow) is several times larger than the load of the construction's own weight. The construction's own weight undergoes the quality control, whereas the load of snow is independent from the weight of the construction.

The essence of the question lies in the fact that using of the above calculated quantile of the margin of carrying capacity N_{rk} for the changing load (for the lifting capacity of the construction) depends on the variability coefficient v_z of the changing load: $v_z = D(P_z)/E(P_z)$.

3. The carrying capacity (safety) margin of the construction under a changing load

The margin Z of the random carrying capacity of a steel construction under a changing load (snow) is understood as protection from overloading the construction and is equal to:

The quantile Z_k of the margin of the carrying capacity of the construction after putting it under a changing load (snow) is:

wherein: $E(Z) = E(N) - E(P_w) - E(P_z)$ – the expected margin of the carrying capacity under the load of snow, $D(Z) = \sqrt{[D^2(N) + D^2(P_w) + D^2(P_z)]}$ – the standard deviation of the margin of carrying capacity under the load of snow.

Parametr niezawodności t zapasu nośności po obciążeniu zmiennym P_z oblicza się ze wzoru:

$$t = E(Z)/D(Z). \quad (6)$$

Należy nadmienić, że współczynnik zmienności $v_z = D(P_z)/E(P_z)$ obciążenia zmiennego (śniegiem) jest wielokrotnie większy od współczynnika zmienności v_w obciążenia własnego i od współczynnika zmienności v_N nośności konstrukcji. Ponadto obciążenie śniegiem jest niezależne od masy konstrukcji. Należy nadmienić, że szacowanie kwantyli i współczynników zmienności obciążenia śniegiem i wiatrem jest odrębnym zagadnieniem [3, 4]. Ich wartości liczbowe zależą od współrzędnych geograficznych. Stosowane w praktyce współczynniki obciążeń klimatycznych wynikają z doświadczenia, związanego z obserwacją szkód występujących w danej strefie.

Porównawcze obliczenie zapasów nośności konstrukcji z lekką i ciężką obudową po obciążeniu śniegiem zależnych od stosunku $E(P_z)/E(P_w)$ pokazano w przykładzie 2.

Przykład 2. Obliczyć kwantyl Z_k zapasu nośności po obciążeniu konstrukcji obciążeniem zmiennym oraz jej awaryjność zakładając oczekiwany zapas nośności po obciążeniu na poziomie

$$E(Z) = E(N) - E(P_w) - E(P_z) = 0,25E(N).$$

Dana jest konstrukcja z ciężkim dachem, w której oczekiwane $E(P_z)$ obciążenie śniegiem jest dwukrotnie mniejsze od oczekiwanego $E(P_w) = 2E(P_z)$ obciążenia ciężarem własnym konstrukcji. Odchylenie standardowe $D(P_w)$ masy konstrukcji wynosi $0,03E(P_w)$. Odchylenie standardowe obciążenia zmiennego wynosi $D(P_z) = 0,12E(P_z)$.

Obliczyć wskaźnik niezawodności t zapasu nośności i awaryjność konstrukcji ciężkiej po obciążeniu zmiennym P_z dla $(P_w) = 2E(P_z)$ i porównać z parametrami zapasu nośności konstrukcji lekkiej, w której $E(P_w) = 0,5E(P_z)$. Należy dotrzymać warunku: $[E(P_w) + E(P_z)] = 0,75E(N)$, zachowując zapas nośności $E(Z)$ po obciążeniu:

$$E(Z) = E(N) - E(P_w) - E(P_z) = 0,25E(N).$$

Wskaźnik t niezawodności zapasu nośności konstrukcji po obciążeniu śniegiem można obliczyć ze wzoru (6) jak niżej.

The parameter of reliability t of the margin of carrying capacity after putting it under a changing load P_z is calculated from the formula:

One should mention that the variability coefficient $v_z = D(P_z)/E(P_z)$ of the changing load (snow) is many times larger than the coefficient of variability v_w of the construction's own load than the variability coefficient v_N of the carrying capacity of the construction. Moreover the snow load is independent from the weight of the construction. One should mention, that estimating of quantiles and variability coefficients of the snow load and the wind load makes up a separate question [3, 4]. Their numerical values depend on the geographical bearings. The climatic load coefficients used in practice result from the experience, connected with observation of damages occurring in a given zone.

The comparative calculation of the margins of the carrying capacity of the construction with light and heavy casing after putting it under load of snow dependent on the relation $E(P_z)/E(P_w)$ has been presented in example 2.

Example 2. Calculate the quantile Z_k of the margin of carrying capacity after putting the construction under changing load and its failure frequency assuming expected margin of carrying capacity after putting it under load at the level

The construction is with a heavy roof in which expected snow load $E(P_z)$ is twice lower than expected load under construction's own weight $E(P_w) = 2E(P_z)$. The standard deviation of the weight of the construction $D(P_w)$ is equal to $0,03E(P_w)$. The standard deviation of the changing load is $D(P_z) = 0,12E(P_z)$.

Calculate the reliability coefficient t of the margin of carrying capacity and the failure frequency of a heavy construction after putting it under changing load P_z for $(P_w) = 2E(P_z)$ and compare the result with the parameters of margin of carrying capacity of a light construction, in which $E(P_w) = 0,5E(P_z)$. The condition: $[E(P_w) + E(P_z)] = 0,75E(N)$ should be kept while maintaining the margin of carrying capacity $E(Z)$ after putting it under load:

We will calculate the reliability coefficient t of the margin of carrying capacity of the construction after putting it under snow load from the formula (6) as below.

W przypadku konstrukcji z obudową ciężką $E(P_w) = 2E(P_z) = 0,5E(N)$ mamy:

$$t = [E(N) - E(P_w) - E(P_z)]/D(Z_r) = \\ = E(N)[1 - 0,5 - 0,25]/E(N)\sqrt{[(0,06^2 + 0,03^2 \cdot 0,5^2 + 0,12^2 \cdot 0,25^2)]} = 0,25/0,06874 = 3,637.$$

Z rozkładu prawdopodobieństwa [1] mamy niezawodność: $p = Pr\{Z > 0,25E(N)\} = 0,999\ 823$. Awaryjność konstrukcji z obudową ciężką wynosi: $q = 1 - p = 0,000\ 177$. Należy oczekiwać 177 awarii na milion wybudowanych obiektów.

W przypadku konstrukcji z obudową lekką $E(P_w) = 0,5E(P_z) = 0,25E(N)$ otrzymano:

$$t = [E(N) - E(P_w) - E(P_z)]/D(Z_r) = \\ = E(N)[1 - 0,25 - 0,5]/E(N)\sqrt{[(0,06^2 + 0,03^2 \cdot 0,25^2 + 0,12^2 \cdot 0,5^2)]} = 0,25/0,08518 = 2,935.$$

Z tablic rozkładu prawdopodobieństwa mamy niezawodność: $p = Pr\{Z > 0,25E(N)\} = 0,998\ 315$. Awaryjność wynosi: $q = 1 - p = 0,001\ 685$. Należy oczekiwać 1685 awarii na milion obiektów. Oczywiście stosuje się profilaktykę w celu zmniejszenia awaryjności, na przykład w postaci usuwania nadmiaru śniegu z dachu.

W przypadku oczekiwanego zapasu nośności $E(Z_r) = 0,25E(N)$ według przykładu 2 awaryjność konstrukcji z lekką obudową dla $E(P_w) = 0,5E(P_z)$ jest ponad 9 razy większa od awaryjności konstrukcji z ciężką obudową. Z przykładu wynika wniosek, że w celu zrównania niezawodności konstrukcji lekkiej z ciężką należy zwiększyć oczekiwany zapas nośności konstrukcji lekkiej do $E(Z) = 0,3E(N)$ według przykładu 3.

Przykład 3. Obliczyć awaryjność konstrukcji lekkiej o parametrach jak w przykładzie 2, zwiększając oczekiwany po obciążeniu zmiennym zapas nośności konstrukcji do $E(Z) = 0,3E(N)$. W tym przypadku pozostawiając $E(P_w) =$ około $0,5E(P_z)$ przyjęto: $E(P_z) = 0,47E(N)$, $E(P_w) = 0,23E(N)$. Odchylenie standardowe oczekiwanego zapasu nośności $E(Z)$ konstrukcji pod obciążeniem zmiennym wynosi:

$$D(Z) = E(N)\sqrt{[(0,06^2 + 0,03^2 \cdot 0,23^2 + 0,12^2 \cdot 0,47^2)]} = 0,08263.$$

Parametr niezawodności t wynosi:

$$t = E(Z)/D(Z) = 0,3/0,082635 = 3,63.$$

Na podstawie rozkładu normalnego [1] mamy niezawodność $p = Pr\{Z > 0,3E(N)\} = 0,999\ 820$. Awaryjność wynosi $q = 1 - p = 0,000\ 180$.

Wniosek: W losowo wybranym przykładzie pokazano, że czterokrotne zwiększenie stosunku oczekiwanego obciążenia zmiennego do obciążenia sta-

In the case of a construction with heavy casing $E(P_w) = 2E(P_z) = 0,5E(N)$ the following comes out:

From the probability distribution [1] the reliability is obtained: $p = Pr\{Z > 0,25E(N)\} = 0,999\ 823$. The failure frequency of the construction with heavy casing is: $q = 1 - p = 0,000\ 177$. One can expect 177 failures per million of built objects.

In the case of a construction with light casing $E(P_w) = 0,5E(P_z) = 0,25E(N)$ the following is obtained:

From the tables of probability distribution we get reliability: $p = Pr\{Z > 0,25E(N)\} = 0,998\ 315$. Failure frequency is: $q = 1 - p = 0,001\ 685$. One can expect 1685 failures per million of built objects. Obviously some prophylactic procedures are used in order to decrease failure frequency, as for instance in the form of removing the excess of snow from the roof.

In the case of expected margin of carrying capacity $E(Z_r) = 0,25E(N)$ according to the example 2 the failure frequency of the construction with light casing for $E(P_w) = 0,5E(P_z)$ is above 9 times larger than the failure frequency of the construction with heavy casing. A conclusion can be drawn from the example, that in order to increase the reliability of the light construction to get it at the same level as that of the heavy construction, the expected margin of the carrying capacity of the light construction should be increased to $E(Z) = 0,3E(N)$ according to example 3.

Example 3. Calculate the failure frequency of a light construction of parameters as in example 2, increasing the expected margin of carrying capacity of the construction under a changing load to $E(Z) = 0,3E(N)$. In this case leaving $E(P_w) =$ about $0,5E(P_z)$ we will assume: $E(P_z) = 0,47E(N)$, $E(P_w) = 0,23E(N)$. The standard deviation of the expected margin of carrying capacity $E(Z)$ of the construction under a changing load is equal to:

The reliability parameter t is:

On the basis of normal distribution [1] we obtain the reliability $p = Pr\{Z > 0,3E(N)\} = 0,999\ 820$. The failure frequency is $q = 1 - p = 0,000\ 180$.

The conclusion: It has been shown in a random chosen example that four-fold increase in the ratio of the expected changing load to the steady load has

tego 9-krotnie zwiększyło awaryjność konstrukcji. Ażeby zrekompensować zwiększenie awaryjności konstrukcji z lekką obudową, należałoby zwiększyć oczekiwany zapas nośności pozostający po obciążeniu zmiennym o 20% do $E(Z) = 0,3E(N)$. Należy nadmienić, że nadzory nad wytwarzaniem elementów wysyłkowych, montażem i eksploatacją konstrukcji w każdym przypadku zmierzają do ograniczenia liczby awarii i redukcji ich skutków. Ale każdy błąd grubo zwiększa liczbę awarii lub katastrof konstrukcji lekkiej w stosunku do ciężkiej.

4. Podsumowanie

Monitorowanie niezawodności wybranych obiektów w celu zapobiegania katastrofom, awariom lub degradacji eksploatacyjnej stało się w niektórych krajach przedmiotem nakazu władz. Monitorowanie obiektów można uważać za jedną z metod inżynierii niezawodności zajmującej się badaniem zgodności postulowanej w projekcie lub przez władze budowlane niezawodności z niezawodnością obiektu zrealizowanego. Efektem badania może być wskazanie konieczności remontu lub wzmocnienia konstrukcji nośnej w trybie remontowym. Dotyczy to zarówno obiektów historycznych jak i obiektów nowoczesnych.

Z zamieszczonych przykładów wynika wniosek ogólny, że w przypadku, gdy współczynnik zmienności obciążenia zmiennego $v_z = D(P_z)/E(P_z)$ jest większy od współczynnika zmienności obciążenia stałego $v_w = D(P_w)/E(P_w)$, to zmiana stosunku obciążenia zmiennego do obciążenia stałego zmienia niezawodność konstrukcji. Dotyczy to w różnym stopniu wszystkich konstrukcji obliczanych zgodnie z normami. Jednakże istotne zmniejszenie bezpieczeństwa występuje w konstrukcjach stalowych hal wielkopowierzchniowych o lekkiej obudowie wskutek wielokrotnie mniejszego obciążenia obudową hal w stosunku do obciążeń zmiennych aniżeli występuje to w halach z obudową ciężką. Masa konstrukcji i obudowy najczęściej charakteryzuje się mniejszym współczynnikiem v_w zmienności od współczynnika zmienności v_z obciążeń zmiennych.

W ostatnim trzydziestoleciu nastąpił proces liczbowego zwiększania się budowy stalowych konstrukcji hal wielko powierzchniowych z pokryciem lekkim dachowymi płytami trójwarstwowymi z rdzeniem termoizolacyjnym i zmniejszania się liczby budów hal z pokryciem ciężkim na przykład za pomocą cienkościennych żelbetonowych płyt panelowych cięższych około 9 razy. Nato-

increased the failure frequency of the construction 9 times. In order to compensate that increase in failure frequency of the construction with light casing one should enlarge the expected margin of carrying capacity which remains after putting it under changing load by about 20% to $E(Z) = 0,3E(N)$. One should mention that supervision over manufacturing of mail-ordered units, assembling and exploitation of the construction in each case is aimed at limiting of the number of failures and the reduction of their results. But each and every grave mistake increases the number of the failures or catastrophes of the light construction in comparison with the heavy one.

4. Recapitulation

Monitoring of reliability of chosen objects in order to prevent catastrophes, collapsing or degradation due to exploiting has become in some countries the object of the warrant issued by the authorities. Monitoring of the objects may be regarded as one of the methods of reliability engineering, which investigates compatibility of reliability as postulated in the design or by the building authorities with the reliability of the object realized. The effect of the investigation may be the necessity to carry out a repair or to strengthen the bearing construction within the renovation mode. This pertains both to historical objects as well as the modern ones.

From the examples presented above a general conclusion may be drawn, that in the case when the variability coefficient of the changing load $v_z = D(P_z)/E(P_z)$ is larger than the variability coefficient of the steady load $v_w = D(P_w)/E(P_w)$, a change of the ratio of the changing load to the steady load changes reliability of the construction. This concerns to various extent all the constructions calculated in accordance with the standards. Yet an essential decrease in the safety occurs in the steel constructions of large surface halls with light casing as the result of many times smaller load of the halls due to the casing in comparison to the changing loads than it takes place in the case of halls with heavy casing. The weight of the construction and casing most often is characterized by lower variability coefficient v_w than the variability coefficient v_z of the changing loads.

In the period of the last thirty years there has taken place the process of increasing the number of constructed large surface halls of steel constructions with light roof coverage made from three-layer plates with thermo-insulating core and decreasing number of constructed halls with heavy coverage, for instance using thin-wall reinforced concretes panel plates which are about 9 times heavier. How-

miast nie uzupełniono normowych wymagań bezpieczeństwa konstrukcji stalowych. Należy nadmienić, że występują znaczące różnice niezawodności różnych systemów konstrukcyjnych i doświadczony projektant potrafi zwiększyć niezawodność projektowanej konstrukcji za pomocą nadliczbowych stężeń.

Wprowadzenie ciepłej i lekkiej obudowy o małym nachyleniu oprócz zmniejszenia bezpieczeństwa konstrukcji wpłynęło na pojawienie się nowych zjawisk fizycznych w postaci konsolidacji gęstości śniegu na ciepłej obudowie wywołanej zamrażaniem wody wsiąkającej w śnieg. W tym procesie zwiększenia się obciążenia przekryć dachowych śniegiem istotną rolę odgrywa małe nachylenie połaci dachowych utrudniające spływ wody z połaci dachowych. Wynika stąd konieczność usuwania ponadnormatywnego śniegu z dachu. Wymaga to kłopotliwego sondowania objętości i gęstości masy śniegu za pomocą rury i przystosowania pokrycia dachowego do usuwania śniegu.

5. Wnioski generalne

1. Wskazany jest przegląd niezawodności konstrukcji stalowych wielko powierzchniowych hal z lekką obudową, zwłaszcza pokrytych płytami trójwarstwowymi z rdzeniem termoizolacyjnym o małym nachyleniu połaci dachowych. Powyższe dotyczy także stalowych konstrukcji historycznych z późniejszymi nawarstwieniami wynikłymi z prowadzonych prac remontowych.
2. Możliwe jest zwiększenie niezawodności konstrukcji w drodze zmian konstrukcyjnych w ustrojach przyjaznych remontom i modernizacji konstrukcji.
3. Wskazane jest uzupełnienie wytycznych projektowania stalowych konstrukcji wielkopowierzchniowych hal, zwłaszcza obudowanych płytami trójwarstwowymi z rdzeniem termoizolacyjnym.

ever, the normative safety requirements for steel constructions have not been made up. One should mention there occur significant differences in reliability of various constructional systems and an experienced designer can increase the reliability of the designed construction using redundant bracings.

Introduction of warm and light casing of small inclination, besides to decreasing the safety of the construction, has influenced on appearing new physical phenomena in the form of consolidation of the density of snow on a warm casing due to freezing of the water soaking in the snow. In this process of increasing the load exerted on the roof covering by snow an essential part is played by small inclination of the roof surfaces, which makes the outflow of water from roof surfaces difficult. This effects in the necessity to remove the excessive amounts of snow, going beyond those determined by the standards, from the roof. This requires troublesome probing of the volume and density of the mass of snow with the use of a pipe and adaptation of the roof coverage to enable removing the snow.

5. General conclusions

1. It is advisable to carry out a review of reliability of steel constructions of large surface halls with light casing, especially those covered with three-layer plates with thermo-insulating core, and of small inclination of the roof surfaces. The same should be done also for historical steel structures with changes connected with repairs and strengthening made during the exploitation
2. It is possible to increase reliability of the construction in the way of constructional changes in the systems which are friendly to repairs and modernization of their construction.
3. It is advisable to supplement the directives for designing steel constructions of large surface halls, especially those built around with three-layer plates with thermo-insulating core.

Literatura • References

- [1] Biegus A., *Probabilistyczna analiza konstrukcji stalowych*, PWN, Warszawa – Wrocław 1999.
- [2] Bogucki W., *Budownictwo stalowe*, t. II. Arkady, Warszawa 1977.
- [3] Chodor L., Dziubdziela W., Kowal Z., *Współczynniki bezpieczeństwa konstrukcji poddanej wielookresowym obciążeniom stochastycznym*, XXXV KN KILW PAN i KN PZITB, Krynica 1989, s. 19-24.
- [4] Dziubdziela W., Kowal Z., *Oszacowanie kwantyli ciągów wielookresowych maksymalnych obciążeń konstrukcji*, Archiwum Inż. Lądowej 1/1989, s. 299-311.
- [5] Dziubdziela W., Kowal Z., *Safety of structures subjected to multi-periodical wind loads*, EECWE-94, East European Conference on Wind Engineering, July 1994, Warsaw, V.1, p. 179-188.

- [6] Kowal Z., *Zuverlässigkeit von Konstruktionssystemen*, Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden 25/1976, H. 1/2, s. 265-270.
- [7] Kowal Z., *O szacowaniu bezpieczeństwa konstrukcji*, Konwersatorium Mechanika Stochastyczna, Szklarska Poręba – Wrocław, maj 1994, s. 17-30.
- [8] Kowal Z., *Statystyczne osłabienie i wzmocnienie konstrukcji*, Inż. i Bud. 7-8/1995, s. 392-394.
- [9] Kowal Z., Polak M., Szpila E., Wydra S., *System przekryć przestrzennych „ZACHÓD”*, Inż. i Bud. 11/1976, s. 421-424.
- [10] Łubiński M., Żółtowski W., *Konstrukcje metalowe*, cz. II, Arkady, Warszawa 1992.
- [11] Praca zbiorowa pod red. W. Boguckiego, *Poradnik projektanta konstrukcji metalowych*, T. II, Arkady, Warszawa 1980.
- [12] Strelecki N.S. i zespół, *Konstrukcje stalowe*, Arkady, Warszawa 1957.
- [13] Żudin N.D., *Stalnyje konstrukcje*, GOSSTROJIZDAT 1957.
- [14] PN – 90 / B – 03200 *Konstrukcje stalowe – Obliczenia statyczne i projektowanie*.
- [15] EUROKOD 3: PN-EN 1993-1– od 1 do 12 (2006 – 2008) *Projektowanie konstrukcji stalowych*.
- [16] PN-EN 1993-1-3-2005 *Obciążenie śniegiem*.
- [17] PN-EN 1993-1-4-2008 *Oddziaływanie wiatru*.
- [18] Katalog techniczny płyt trójwarstwowych, GÓR-STAL GORLICE 2008.

* Politechnika Świętokrzyska, Kielce, Polska
Kielce University of Technology, Kielce, Poland