

STAN AWARYJNY STALOWEJ KONSTRUKCJI NOŚNEJ OBIEKTU WIELKOPOWIERZCHNIOWEGO

JERZY SENDKOWSKI, e-mail: [jerzysendkowski\[at\]ankra.pl](mailto:jerzysendkowski[at]ankra.pl)
Biuro Budowlane Ankra sp. z o.o. Kielce

ANNA TKACZYK
ŁUKASZ TKACZYK
Biuro Budowlane Bauko s.c. Kielce

Streszczenie: W pracy poddano analizie i omówiono stan zagrożenia awarią budowlaną konstrukcji nośnej obiektu wielkopowierzchniowego. Zauważono, że w wyniku rozsunięcia blach doczołowych w styku zachodzi dodatkowe rozciąganie i zginanie śrub. W pracy opisano rozpoznanie stanu awaryjnego konstrukcji nośnej obiektu wielkopowierzchniowego (ok. 14 000m²). Omówiono mechanizm prowadzący do powstałych uszkodzeń śrub w połączeniu segmentów ram nośnych obiektu, stwarzający możliwość kaskadowego zniszczenia połączenia, a w konsekwencji ramy i całego obiektu. Podano przyczyny powstałego zagrożenia awarią budowlaną. Opisano sposób skutecznego usunięcia zagrożenia. Podano oryginalne rozwiązanie prowadzące do spełnienia stanu granicznego nośności i użyteczności konstrukcji nośnej obiektu wielkopowierzchniowego.

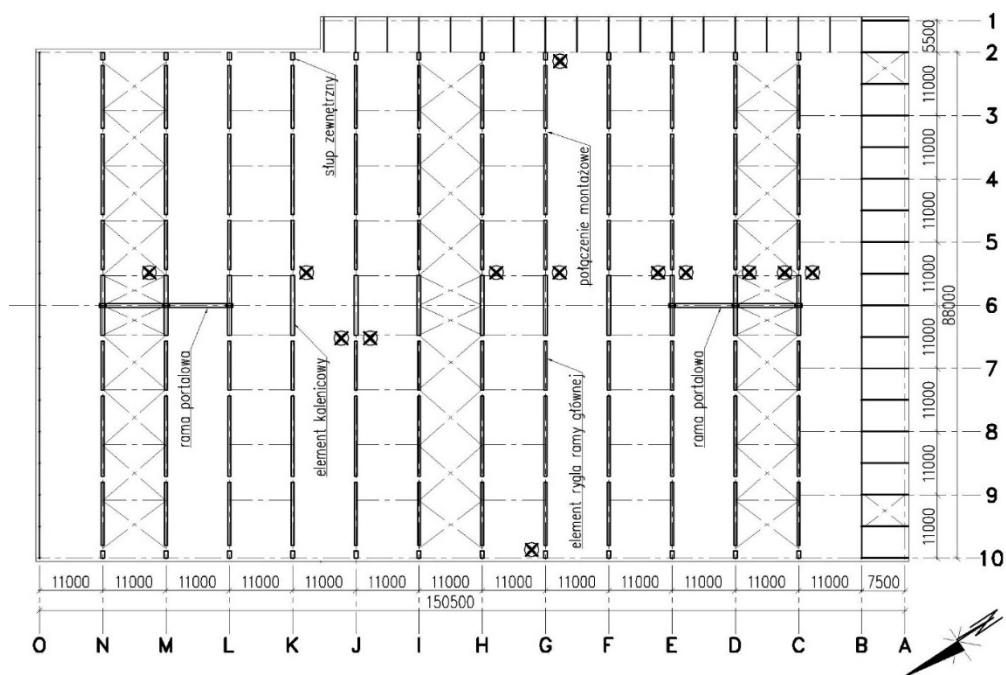
Słowa kluczowe: awaria budowlana, obiekt wielkopowierzchniowy, połączenie doczołowo nakładkowe, zdolność do obrotu

1. Wstęp

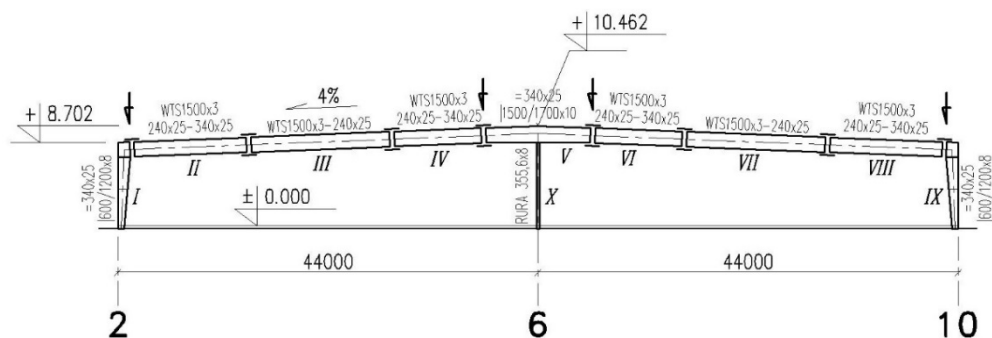
O uszkodzeniach doczołowo-stycznych połączeń dźwigarów z falistym środnikiem obiektu wielkopowierzchniowego pisano w pracy Z. Kowala i Ł. Tkaczyka [1]. W niniejszej pracy autorzy przedstawiają uzupełnienie opisu przyczyny powstania uszkodzeń, wskazujące na stan awaryjny konstrukcji nośnej obiektu. Pokazują sposób wykonanej naprawy wg opracowanego przez autorów projektu napraw oraz podają wskazówki projektowania tego typu połączeń, spełniających choćby w części postulat zgodności pola deformacji (blach doczołowych) i nakładkowej części połączenia (pasa dolnego i górnego dźwigara).

2. Opis analizowanej konstrukcji nośnej

Przedmiotem pracy są uszkodzenia dźwigarów z falistym środnikiem w obrębie połączeń doczołowo nakładkowych (nazwanych w pracy [1] doczołowo stycznymi). Takie połączenia zastosowano w ryglach ram konstrukcji nośnej hali obiektu wielkopowierzchniowego o rzucie pokazanym na rys. 1. Na rys. 1 oznaczono miejsca uszkodzeń połączeń. Uszkodzenia połączeń polegały na zerwaniu najbardziej wyężonych śrub oraz rozwarciu styków montażowych, które wystąpiły w 12 ramach. Szerszy opis konstrukcji obiektu zamieszczony jest w pracy [1].



Rys. 1a. Schemat hali, wraz z oznaczeniem miejsc uszkodzeń



Rys. 1b. Powtarzalna dwunawowa rama ustroju nośnego obiektu

3. Opis uszkodzeń

Podczas przeglądu technicznego (w okresie zimowym wystąpiły opady śniegu, dające obciążenie śniegiem zbliżone do pełnego obciążenia projektowego) zinventaryzowano zerwanie ogółem 13 śrub w stykach montażowych ram głównych hal w miejscach pokazanych na rys. 1 (oznaczonych kółkiem z krzyżykiem). Umieszczony symbol ☒ na rys. 1 oznacza miejsce, w którym nastąpiło zerwanie śrub. Śruby uległy zniszczeniu wyłącznie w miejscach, w których występuje ujemny moment zginający i rozciągany jest pas górny rygła. Zerwaniu ulegały zawsze śruby w części czołowej styku w najwyższym rzędzie (rys. 2). W części czołowej styku zastosowane były śruby M16 kl. 5.8. W części nakładkowej połączenia zastosowano śruby M24 kl. 10.9 łączące nakładkę ze stali 18G2 z pasami elementów montażowych rygła

ramy. Połączenie wykonano, jako zgrubne (dające możliwość przesunięcia pomiędzy nakładkami a pasami górnymi elementów montażowych rygla ramy), generujące tym samym możliwe rozwarście styku doczołowego.



Rys. 2. Rozwiązanie styku pomiędzy elementami montażowymi i widoczne zerwanie śruby w połączeniu blach czołowych rygli ramy

4. Analiza przyczyny uszkodzeń

Przedmiotowe połączenie jest połączeniem doczołowym, nakładkowym niesprężanym (nazywanym niekiedy doczołowo stycznym, zakładkowym). Momentowi zginającemu w styku doczołowym towarzyszy siła poprzeczna V oraz siła normalna N . Rozkład sił wewnętrznych i pomierzony stan przemieszczeń wybranej ramy pokazano na rysunku 3.

W omawianym przypadku, w doczołowo zakładkowych połączeniach dźwigarów SIN rozciągnięto ideę wymiarowania przekroju dźwigarów [2, 3, 4, 5, 6], na połączenia doczołowo nakładkowe. Jak wiadomo idea ta pozwala na wymiarowanie przekroju pasów na siły (1):

$$P_f = +/- N +/- M / (h - t_f) \leq n_f S_R \quad (1)$$

gdzie:

M , N – moment zginający, siła normalna w styku,

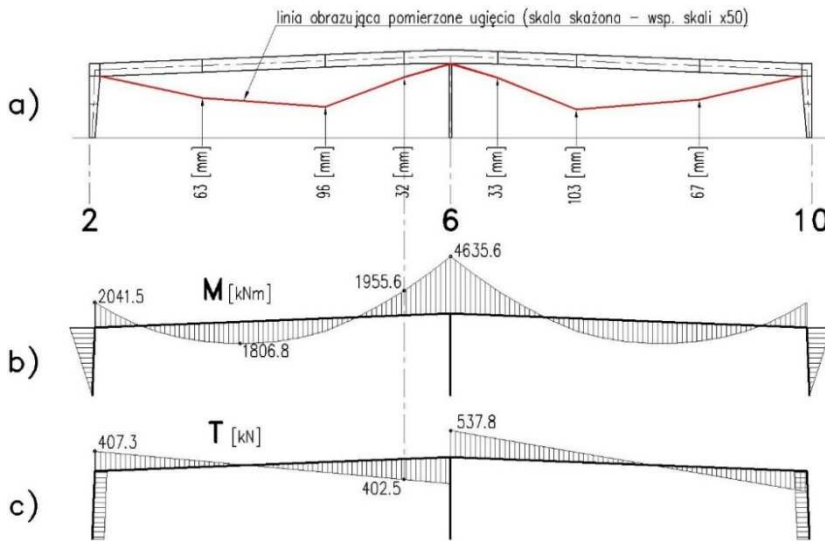
P_f – siła obciążająca jedno lub dwustronne nakładki uciągające przecięte w styku pasy,

h , t_f – wysokość i grubość pasa dźwigara z falistym środkiem,

n_f – liczba śrub z jednej strony styku pasów,

S_R – nośność pojedynczej śruby

$M_w = 0$, moment zginający przenoszony przez środek



Rys. 3. Rozkład sił wewnętrznych pod obciążeniem projektowym i pomierzony stan przemieszczeń

Falisty środnik w zasadzie nie przenosi naprężeń normalnych (ta część momentu zginającego przypadająca na środnik w przypadku dźwigarów z falistym środnikiem M_w jest w zasadzie równa zero) Środnik wymiaruje się na obciążenia poprzeczne V .

Idea ta przeniesiona z wymiarowania dźwigarów SIN w połączeniach doczołowo nakładkowych może być realizowana w połączeniach doczołowo nakładkowych rygla ram konstrukcji nośnej hali obiektów wielkopowierzchniowych, pod warunkiem dotrzymania jednorodności odkształceń (blach doczołowych) i nakładkowej części połączenia (pasów dolnych i górnych elementów wysyłkowych rygla ram konstrukcji nośnych).

Przez zgodność pola deformacji należy rozumieć taki stan, który charakteryzuje się małym gradientem zmian, porównywalnym, co do wartości bezwzględnej w poszczególnych zarówno ciągłych jak i nieciągłych obszarach elementów połączenia (między sąsiednimi elementami montażowymi rygla ram, między elementami pasów dolnych i górnych, otworami w pasach i nakładkach), w odróżnieniu do zgodności pola odkształceń sformułowanych przez równania mechaniki ciała stałego [7, 8, 9] a postulującymi ciągłość funkcji opisujących pole odkształceń oraz spełniających równanie (2):

$$e_{ij} = \frac{1}{2} [u_{i,j} + u_{j,i} - u_{\alpha,i} \cdot u_{\alpha,j}] \quad (2)$$

W pracach [7, 8, 9], przez warunek ciągłości odkształceń w przypadku dwuwymiarowym rozumie się związek różniczkowy (3):

$$\frac{\partial \epsilon_x^2}{\partial y^2} + \frac{\partial \epsilon_y^2}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} \quad (3)$$

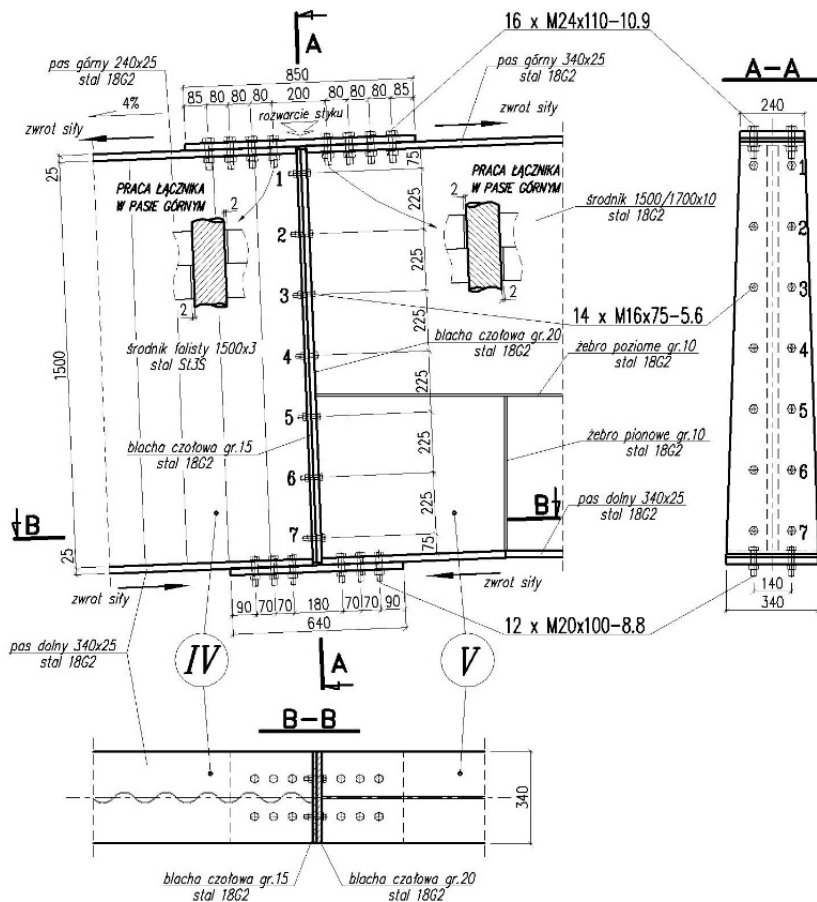
Powyższy związek różniczkowy musi być spełniony przez składowe stanu odkształcenia. Zapewniają to funkcje stanu przemieszczeń u i v opisujące stan przemieszczeń. Wg [7, 8, 9] za jednorodny stan odkształcenia uważa się stan, w którym wszystkie jego składowe stanu są stałe w całym ciele.

W realnej konstrukcji występuje wiele odkształcalnych elementów konstrukcji scalonych w ustrój nośny z jej inkluzjami i wszelkimi imperfekcjami, a ich zachowanie nie zawsze daje się jednoznacznie opisać, by zbudowany model matematyczny i fizyczny oddawał jej pracę zgodną z rzeczywistością.

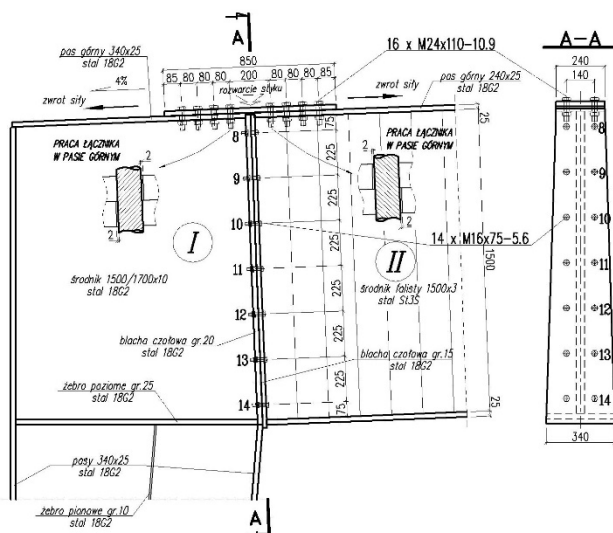
Aby ten postulat choćby w części spełnić w doczołowych połączeniach zginanych i ścinanych [3] należy przyjąć zasadę, że siłę poprzeczną przenoszą wyłącznie śruby usytuowane w strefie ściskanej połączenia. Przyjmując tę zasadę śruby w połączeniu doczołowym należało umieścić w strefie ściskanej.

Podsumowując, doczołową część połączenia skonstruowano bez uwzględnienia rzeczywistych warunków pracy połączenia. Nie uwzględniono możliwych do wystąpienia imperfekcji złożenia i tolerancji wykonania [10, 11, 12, 13], czym doprowadzono do przeciążenia śrub skrajnego rzędu, a dalej do ich zerwania. Po przeprowadzonych analizach obliczeniowych wykluczono możliwość kaskadowego uszkodzenia kolejnych śrub w blasze doczołowej, uszkodzenia rygla ramy, jak i całego obiektu, a stan zagrożenia awarią oceniono jako niski.

Zatem, przyczyną powstania uszkodzeń jest błędne rozwiązanie projektowe, umieszczające śruby w styku doczołowym w strefie rozciąganej, zbyt blisko pasa rozciąganego. Rozwiązanie projektowe węzłów wg, którego zrealizowano obiekt pokazano to na rysunku 4.

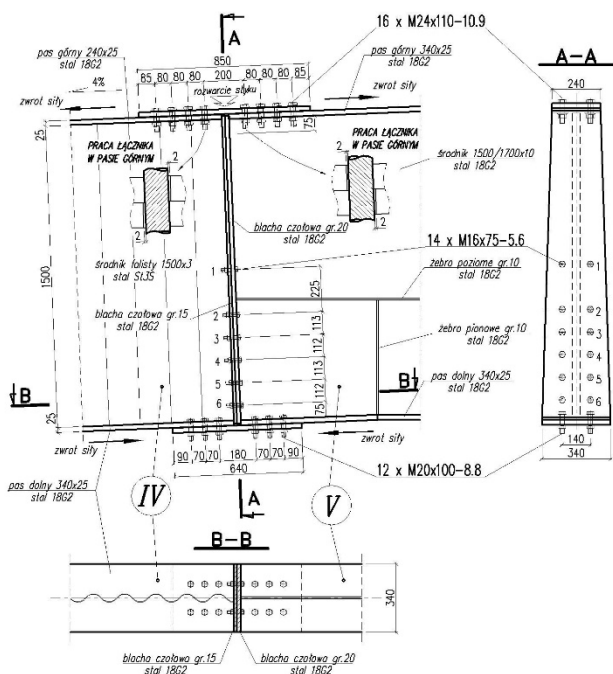


Rys. 4a. Połączenie doczołowo-nakładkowe pomiędzy elementami montażowymi rygla zaprojektowane i zrealizowane w analizowanym obiekcie wielkopowierzchniowym



Rys. 4b. Połączenie doczołowo-styczne pomiędzy słupem skrajnym a ryglem ramy zaprojektowane i zrealizowane w analizowanym obiekcie wielkopowierzchniowym

W połączeniach doczołowych zginanych i ścinanych przyjmuje się zasadę, że siłę poprzeczną przenoszą wyłącznie śruby usytuowane w strefie ściskanej połączenia. Przyjmując tę zasadę zaproponowano i zrealizowano naprawę poprzez umieszczenie śrub ścinanych w strefie ściskanej. Rozwiązanie naprawy pokazano na rysunku 5.



Rys. 5a. Zaproponowany i zrealizowany sposób naprawy połączenia doczołowo nakładkowego pomiędzy elementami montażowymi rygła w analizowanym obiekcie wielkopowierzchniowym

5. Wnioski

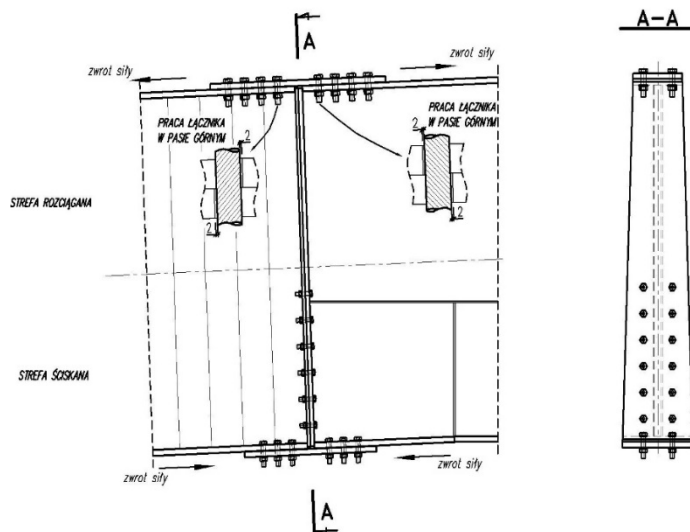
W przedstawionym ustroju nośnym ram o węzłach podatnych, należałoby zastosować w przekrojach krytycznych połączenia posiadające zbliżoną sztywność i stosowną zdolność do obrotu, ale tak by zapewniona była nośność krytyczna i nośność graniczna całego systemu konstrukcyjnego [2,3,4,5,6,14,15,16,17].

Od czasu naprawy nie zanotowano żadnych dalszych uszkodzeń śrub w połączeniach.

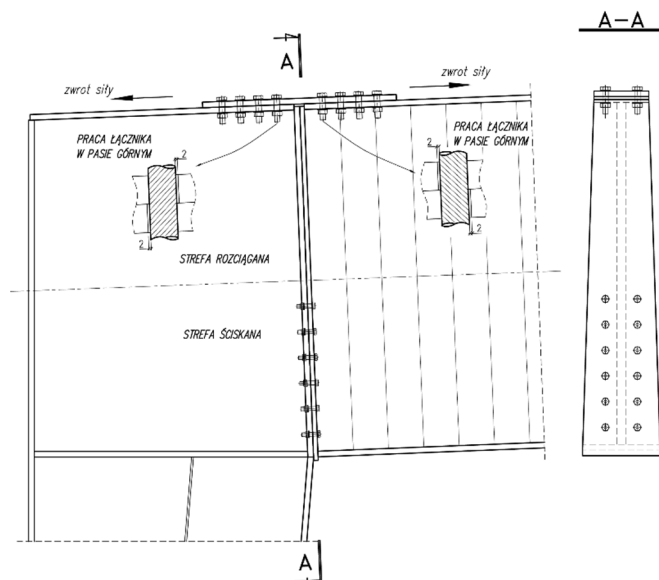
Dodatkowo na etapie projektowania połączeń doczołowo nakładkowych można rozważyć zastosowanie w nakładkowej części połączenia sprężanie śrub, przekazujące siły styczne za pośrednictwem tarcia (wskazane tutaj byłoby przeprowadzenie stosownych badań ilościowych połączeń doczołowo nakładkowych).

Natomiast w połączeniu blach czołowych nie zaleca się stosować śrub sprężanych, z uwagi na to by, choćby w części zachować postulat zgodności pola deformacji w doczołowych połączeniach zginanych i ścinanych [7, 8, 9]. Należy przyjąć zasadę, że siłę poprzeczną przenoszą wyłącznie śruby usytuowane w strefie ściskanej połączenia. Przyjmując tę zasadę, śruby należało umieścić w strefie ściskanej.

Zaproponowana naprawa połączenia i niniejszy artykuł powstał na bazie zgłoszenia do Urzędu Patentowego nr P.409029, którego ideę pokazano na rysunku 6.



Rys. 6a. Proponowane rozwiązanie połączenia rygli ramy (siła poprzeczna przenoszona przez śruby umieszczone w strefie ściskanej)



Rys. 6b. Proponowane rozwiązanie połączenia rygla ze słupem (siła poprzeczna przenoszona przez śruby umieszczone w strefie ściskanej)

Literatura

1. Kowal Z., Tkaczyk Ł.: Uszkodzenia doczołowo-stycznych połączeń dźwigarów z falistym środnikiem, XXIII Konferencja naukowo-techniczna Awary Budowlane, Szczecin Międzyzdroje 2007 r.
2. Augustyn J., Łaguna J., Śliwka W.: Badanie sprężonych doczołowych stalowych belek dwuteowych, Inżynieria i Budownictwo nr 11/12, 1982 r.
3. Biegus A.: Stalowe budynki halowe. Arkady Warszawa 2003 r.
4. Bródka J., Brodniewicz M.: Metody konstruowania i łączenia elementów stalowych. Konstrukcje stalowe, Czasopismo Polskiej Izby Konstrukcji Stalowych, nr 3(92) czerwiec 2008 r.
5. Kozłowski A., Pisarek Z., Wierzbicki S.: Projektowanie doczołowych połączeń śrubowych wg PN-En 1993-1-1 i PN – EN 1993-1-8. Inżynieria i Budownictwo, 4/2009.
6. Kucharczuk W.: Stalowe hale i budynki wielokondygnacyjne, Częstochowa.
7. Timoszenko S., J.N. Goodier, Teoria Sprężystości, ARKADY, Warszawa, 1992 r.
8. Y.C.Fung, Podstawy mechaniki ciała stałego, PWN, Warszawa, 1969.
9. Piechnik Sf.: Mechanika techniczna ciała stałego, Wydawnictwo PK. Kraków 2007 r.
10. Urbańska Galewska E.: Tolerancje w budownictwie stalowych konstrukcji prętowych. Monografia nr 52 Politechniki Gdańskiej, 2009.
11. Urbańska Galewska E.: Tolerancje w budowlanych konstrukcjach stalowych łączonych na śruby, Monografie 59, Politechnika Gdańska 2005.
12. Urbańska Galewska E.: O zasadach określania tolerancji wymiarów stalowych konstrukcji prętowych. Konstrukcje stalowe, Czasopismo Polskiej Izby Konstrukcji Stalowych, nr 4(93) sierpień 2008 r.
13. PN-B-06200: 2002, Konstrukcje stalowe – warunki wykonania i odbioru. Wymagania podstawowe.
14. Biegus A.: Połączenia śrubowe, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa-Wrocław 1997 r.
15. Łaguna J., Łypacewicz K.: Połączenia śrubowe i nitowe, Arkady, Warszawa 1986 r.
16. Wytyczne: Profile z falistym środnikiem SIN. Dokumentacja techniczna GZP.
17. Polska Norma PN-90/B-03200, Konstrukcje stalowe – Obliczenia statyczne i projektowanie.

A FAILURE ANALYSIS OF AN LARGE-AREA STEEL BUILDING

Abstract: A failure condition of a large-area steel building steel is analyzed and discussed by the authors in this paper. It was noticed, that as a result of plate separation, additional tensile and flexure stresses are developed at the connection. Identification of the failure state of the large-area (around 14 000 m²) steel building is discussed. A failure mechanism of the bolt, that caused the risk of cascade failure of the connection and the entire structure is presented. Causes of the occurred failure state were provided. Also, effective threat elimination was described. Original solution meeting the strength and serviceability requirements are presented.

Keywords: structural failure, large building, end plate connection, rotation capacity