DOMINIKA TOMSKA, *dominika.tomska@pracowniaprojektowa.com.pl*
MARCIN SKWAREK, *marcin.skwarek@pracowniaprojektowa.com.pl*
Pracownia Projektowa M.Skwarek, J.Hulimka Sp. J.
JACEK HULIMKA, *jacek.hulimka@polsl.pl*
Politechnika Śląska w Gliwicach

BŁĄD PROJEKTOWY PRZYCZYNĄ WZMOCNIENIA STALOWYCH BELEK PODSUWNICOWYCH

STRENGTHEN OF STEEL CRANE BEAM CAUSED BY DESIGNED MISTAKE

Streszczenie W referacie przedstawiono problem błędnego zaprojektowania blachownicowych belek podsuwnicowych. Projektant pominął w obliczeniach zjawisko zmęczenia oraz popełnił parę drobniejszych błędów, świadczących o nieznajomości zasad projektowania belek. W sytuacji wykonania wadliwie zaprojektowanych belek zaproponowano sposób ich wzmocnienia tak, aby spełniały wszystkie wymagane warunki stanów granicznych. Wzmocnienia te zostały zrealizowane zgodnie z odrębnym projektem, a hala jest obecnie użytkowana przy pełnym, nominalnym obciążeniu suwnic.

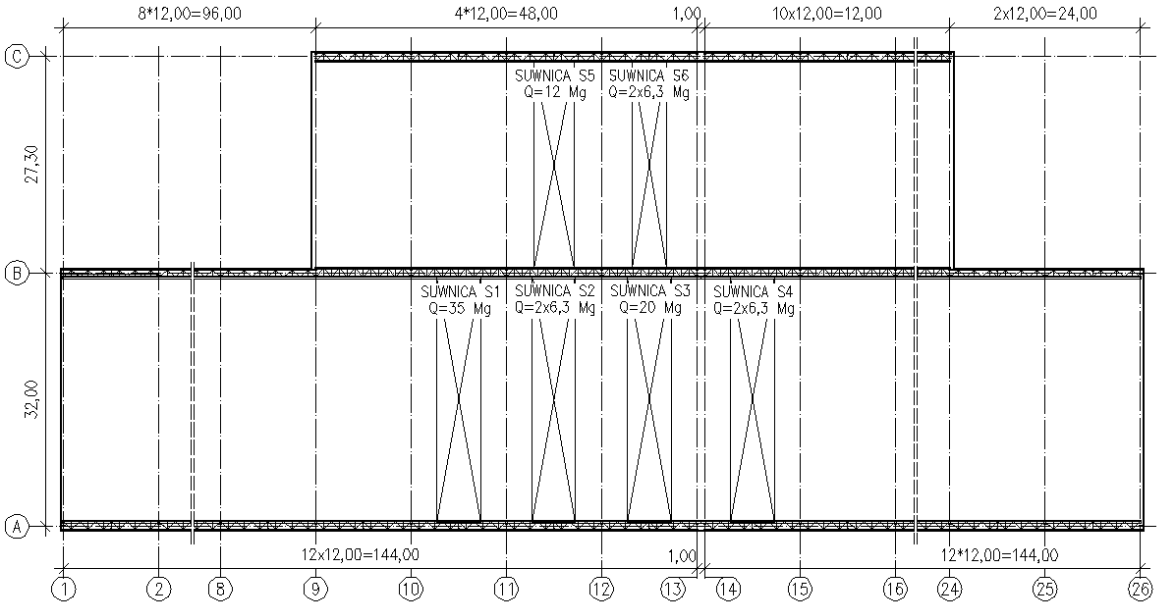
Abstract The paper presents the problem of mistaken design of steel crane beams. Designer in his calculations omitted a fatigue occurence and made a few less mistakes, which show ignorance of beams' designing rules. In situation, when wrong designed beams are made and assembled, the way of strengthhening them is proposed. Those strengthens were made according to separate design, and steel hall is actually using with full, nominal cranes' loads.

1. Wprowadzenie

Przedmiotowe belki podsuwnicowe zlokalizowane są w hali produkcyjno-magazynowej wykonanej w stalowej konstrukcji szkieletowej z lekką obudową. Hala jest obiektem dwunawowym, bez ścian wewnętrznych, z suwnicami w każdej nawie. Nawę AB tworzy 25 przęseł, natomiast nawę BC 14 przęseł. Rozpiętość przęseł w nawie AB wynosi 32,0 m, w nawie BC 27,3 m, a ich długość w każdej z naw wynosi 12,0 m. W nawie AB użytkowane są cztery suwnice w układzie 35 T, 2×6,3 T, 20 T, 2×6,3 T, a w nawie BC dwie suwnice w układzie 12 T, 2×6,3 T. Rzut hali wraz z układem suwnic przedstawiono poniżej (rys. 1).

W hali wbudowano jednoprzęsłowe belki podsuwnicowe, pierwotnie zaprojektowane jako użebrowane blachownice o przekroju dwuteowym, o dwóch różnych wysokościach w poszczególnych nawach (1,445 m w nawie AB oraz 1,032 m w nawie BC). W dalszej części referatu w sposób szczegółowy zostanie przedstawiona tylko belka podsuwnicowa znajdująca się w nawie AB, której dokładne wymiary przedstawiono na rysunku 2. Analogicznie bowiem postąpiono z belką w nawie BC.

Zaznaczyć tu należy, że projekt hali, a co za tym idzie także późniejsze obliczenia opisane w niniejszym referacie, wykonywane były jeszcze zgodnie z Polskimi Normami.



Rys. 1. Rysunek poglądowy (rzut) hali wraz z układem suwnic

2. Błędy projektowe

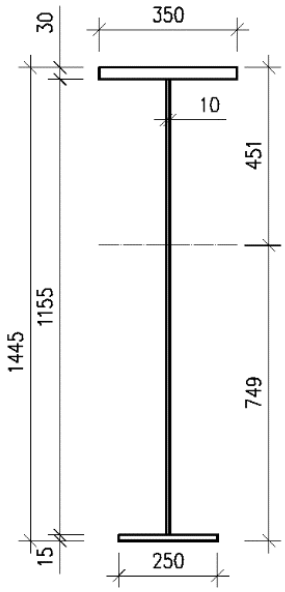
W czasie realizacji hali Inwestor zlecił autorom referatu wykonanie kontrolnych obliczeń [1] belek podsuwnicowych – już sprefabrykowanych i w większości wbudowanych. W wyniku przeprowadzonej analizy statyczno-wytrzymałościowej, której celem była weryfikacja przyjętej geometrii belek, ujawniono szereg błędów popełnionych na etapie projektowania, które w istotny sposób mogły wpłynąć na bezpieczeństwo użytkowania konstrukcji.

Zgodnie z zaleceniami normy [2] przy wymiarowaniu torów jezdnych należy uwzględniać następujące oddziaływania:

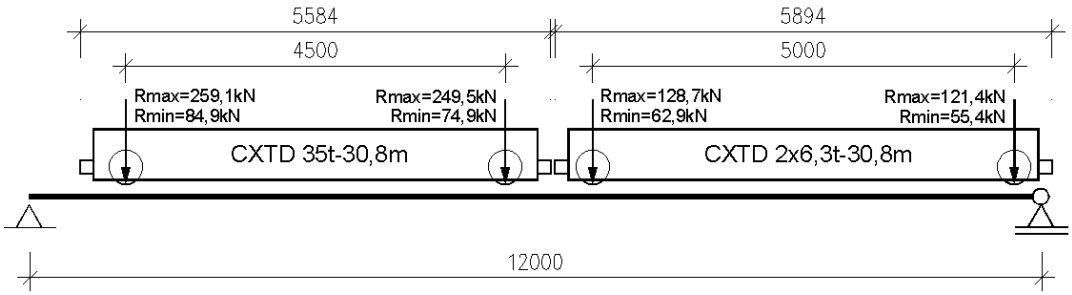
– obciążenia związane z eksploatacją dźwignic (ustalane zgodnie z normą [3]),
– inne obciążenia bezpośrednie (stałe i zmienne), zgodnie z normą [4],
– oddziaływania pośrednie (wewnętrzne) wynikające ze współpracy belki z konstrukcją wsporczą,
– obciążenie technologiczne pomostów remontowych i chodników, przyjmowane odpowiednio do wymagań szczegółowych, lecz nie mniejsze niż 1,5 kN/m^2.

Ponadto, przy projektowaniu torów jezdnych dźwignic natorowych, jako obciążenie wielokrotnie zmienne należy przyjmować obciążenia technologiczne wyłącznie w postaci sił pionowych, pomijając oddziaływania poziome. Należy także pamiętać o poprawnym oszacowaniu obciążeń wyjątkowych (siła uderzenia w odbój), które wyznacza się wg załącznika 5 normy [2], lub przyjmuje się zgodnie z wytycznymi producenta. Schemat statyczny zaprojektowanych belek podsuwnicowych wraz z układem suwnic przedstawia rysunek 3.

Autor oryginalnych obliczeń przyjął siły pionowe oraz poziome przypadające na belki suwnic i tężnik hamowny pochodzące jedynie od dźwignic, pomijając w przypadku obliczeń tężnika hamownego obciążenia pionowe od ciężaru własnego. Niedoszacowanie obciążeń spowodowało błędne przyjęcie profilu, z jakiego zaprojektowano zewnętrzny pas kratowy tężnika hamownego, w którym nie uwzględniono momentu zginającego działającego w kierunku pionowym. W wyniku przeprowadzonych obliczeń sprawdzających wykazano, iż współczynnik wykorzystania nośności zewnętrznego pasa kratowego tężnika hamownego wynosił 1,46.



Rys. 2. Przekrój poprzeczny oryginalnie zaprojektowanej belki podsuwnicowej



Rys. 3. Schemat statyczny belki oraz układ suwnic

Zgodnie z zaleceniami normy [2] zał. 5, pkt. 4.1, przy wymiarowaniu torów jezdnych suwnic obowiązują ogólne i lokalne warunki nośności elementów i połączeń, warunki sztywności oraz warunki trwałości (sprawdzenie nośności belek ze względu na zmęczenie). Ponadto, w przypadku belek suwnic natorowych należy sprawdzić nośność (stateczność) środnika belki pod obciążeniem skupionym. Według pkt. 5.1 szczegółowe sprawdzenie nośności belek ze względu na zmęczenie nie jest wymagane w następujących przypadkach:

– przy obciążeniu suwnicami grupy natężenia pracy nie wyższej niż A3, gdy w konstrukcji belek nie występują karby kategorii zmęczeniowej niższej niż $\Delta\sigma_c$ = 57,0 MPa,
– przy obciążeniu suwnicami grupy natężenia pracy nie wyższej niż A4, gdy w konstrukcji belek nie występują karby kategorii zmęczeniowej niższej niż $\Delta\sigma_c$ = 80,0 MPa.

W analizowanym projekcie stwierdzono brak obliczeń sprawdzających nośność środnika belki pod obciążeniem skupionym zgodnie z pkt. 4.2.4 normy [2] oraz stateczność środnika w złożonym stanie naprężenia zgodnie z pkt. 4.2.5. Autor obliczeń pominął także sprawdzenie nośności połączenia pasa ze środnikiem blachownicy z uwagi na siłę rozwarstwiającą. Wielkość spoin łączących środnik blachownicy z pasem dolnym i górnym została przyjęta z warunków konstrukcyjnych, co, jak się później okazało, było niewystarczające ze względu na nośność ogólną belki i nośność zmęczeniową.

Na podstawie danych technicznych suwnic zawartych w oryginalnym projekcie przyjęto grupę natężenia pracy dźwignic jako A5. Dodatkowo stwierdzono, iż w konstrukcji belek występują karby o kategorii zmęczeniowej niższej niż 57,0 MPa. Zgodnie z zaleceniami normy

[2] jak i [5] należało zatem przeprowadzić szczegółową analizę zmęczeniową belek, pominiętą w oryginalnym projekcie.

W wyniku obliczeń wykazano, że największe i najmniejsze naprężenia w rozciąganym pasie dolnym belki wynoszą odpowiednio:

– σ_{max} = 254,5 MPa,

– σ_{min} = 5,15 MPa.

Do sprawdzenia nośności zmęczeniowej belki przyjęto klasę obciążenia belki K_4 oraz klasę wykorzystania dźwignicy H_4 wg [3], co dało największą liczbę cykli obciążenia równą $2{,}5\times10^5$ (dla nominalnego dwudziestoletniego okresu eksploatacji). Dla tak przyjętych założeń wyznaczono równoważny zakres zmienności naprężeń wynoszący:

$$\Delta\sigma_C = \alpha_k \cdot max\,\Delta\sigma = 249{,}35\,MPa \tag{1}$$

Zgodnie z normą [2], tablica Z3-1 ustalono kategorię zmęczeniową $\Delta\sigma c$ = 36,0 MPa, jak dla styków pasa ze środnikiem na obustronne spoiny pachwinowe normalnej jakości. Na podstawie wzoru Z3-5 normy wyznaczono wytrzymałość zmęczeniową równą:

$$\Delta\sigma_R = 0{,}735 \cdot \Delta\sigma_C \cdot \left(\frac{5\cdot10^6}{N}\right)^{1/m} = 71{,}82\,MPa \tag{2}$$

W efekcie warunek nośności zmęczeniowej dla częściowego współczynnika bezpieczeństwa γ_{fat} = 1,0 miał następującą postać:

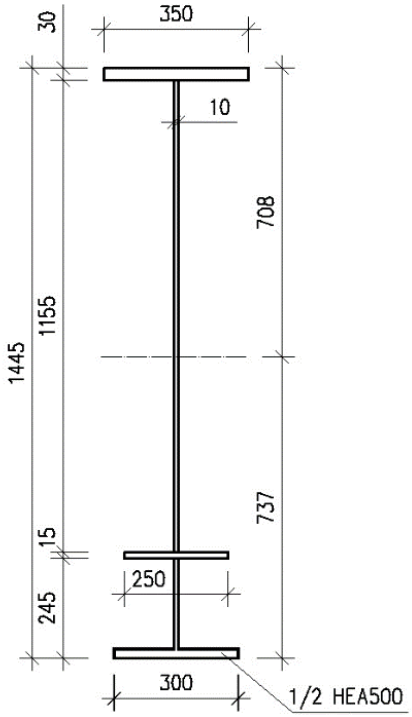
$$\Delta\sigma_R = 71{,}82\,MPa < \Delta\sigma_C = 249{,}35\,MPa \tag{3}$$

Na podstawie warunku (3) stwierdzono, iż nośność zmęczeniowa belki podsuwnicowej z uwagi na zastosowane spoiny jest ponad trzykrotnie przekroczona. W efekcie zaistniała konieczność przeprojektowania belek jezdnych tak, aby spełniały one warunek nośności ze względu na wysokocyklowe zmęczenie materiału.

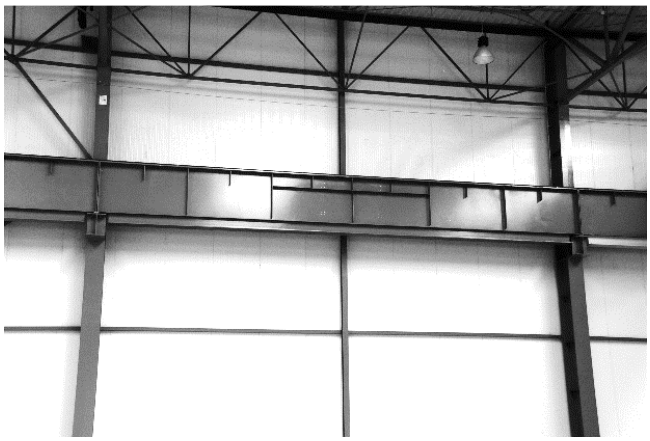
3. Wzmocnienie

W opisanej sytuacji najprostszym rozwiązaniem było zaprojektowanie i wykonanie nowych belek. Jednak, z uwagi na fakt wykonania wszystkich planowanych do wbudowania belek, zdecydowano się na ich wzmocnienie. Po analizie możliwych rozwiązań uznano, że najwłaściwsze będzie przesunięcie środka ciężkości oraz zwiększenie sztywności względem osi poziomej przekroju poprzecznego tak, aby ograniczyć naprężenia i zakres ich zmienności w newralgicznych miejscach przekroju, to jest w spoinach łączących środnik z pasami belki. Przekrój poprzeczny wzmocnionej belki w nawie AB przedstawiono na rysunku 4. Analogicznie wykonano wzmocnienie belek w nawie BC.

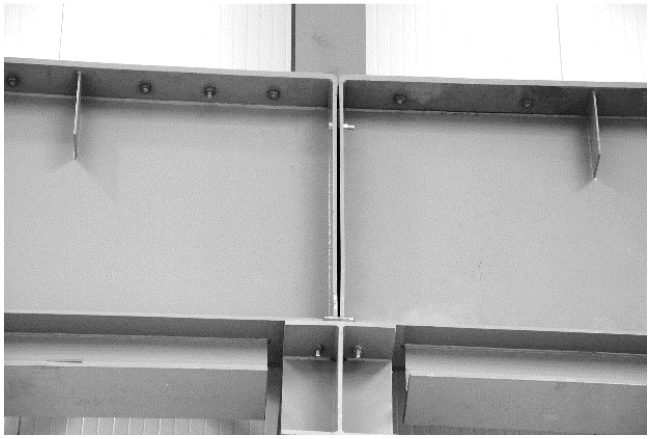
Zwiększenie sztywności względem osi x-x, czyli w konsekwencji zwiększenie wartości momentu bezwładności I_x przekroju poprzecznego belki uzyskano poprzez dospawanie od dołu belki profili 1/2HEA500 (w belkach w nawie AB) oraz 1/2IPE500 (w belkach w nawie BC) ze stali St3S. Wzmocnienie wykonano wzdłuż pojedynczego przęsła belki, wykonując podcięcia na podporach, co obrazują rysunki 5 i 6.



Rys. 4. Przekrój poprzeczny wzmocnionej belki podsuwnicowej



Rys. 5. Widok wzmocnionych belek podsuwnicowych



Rys. 6. Widok podparcia wzmocnionych belek podsuwnicowych

Po wzmocnieniu największy równoważny zakres zmienności naprężeń w newralgicznym punkcie wynosi:

$$\Delta\sigma_C = \alpha_k \cdot max\,\Delta\sigma = 67{,}81 MPa \tag{4}$$

W efekcie warunek nośności zmęczeniowej dla częściowego współczynnika bezpieczeństwa γ_{fat} = 1,0 ma następującą postać:

$$\Delta\sigma_R = 71{,}82 MPa > \Delta\sigma_C = 67{,}81 MPa \tag{5}$$

Należy tu podkreślić, że wykonane w trakcie obciążeń próbnych wzmocnionych belek pomiary geodezyjne wykazały wartości ugięć niższe od dopuszczalnych. Pozwala to uznać, że oryginalnie zaprojektowane belki (znacznie mniej sztywne) nie spełniłyby warunku stanu granicznego ugięć.

4. Podsumowanie i wnioski

Projektowanie belek podsuwnicowych pozornie nie odbiega od projektowania innych, typowych elementów konstrukcyjnych. Wyróżniają je jednak dwa zasadnicze zagadnienia. Pierwszym z nich jest cykliczność obciążeń, występujących setki tysięcy razy w przewidywanym okresie użytkowania konstrukcji. Tym samym, konieczne jest sprawdzenie, czy wymagana jest analiza zmęczeniowa konstrukcji, a jeśli tak, poprawne jej wykonanie. Drugim z problemów jest „nieuchronność" wystąpienia maksymalnych obciążeń, na które projektowany jest element – zwykle bowiem suwnica dobrana jest pod kątem efektywnego wykorzystania nominalnej nośności.

Połączenie powyższych cech powoduje, że belki podsuwnicowe wymagają szczególnie ostrożnego i odpowiedzialnego podejścia do projektowania, a to zwykle związane jest z doświadczeniem. Tymczasem w opisanym przypadku najwyraźniej zabrakło tego ostatniego, a młody projektant, krótko po zdobyciu uprawnień, wykazał zbyt lekkie podejście do tematu.

Na opisany problem spojrzeć można także w nieco szerszym kontekście, wobec pojawiających się propozycji przyznawania uprawnień budowlanych bezpośrednio po ukończeniu studiów magisterskich. W sytuacji takiej obawiać się można tylu wadliwych projektów, że w miejsce konferencji „Awarie Budowlane", piętnującej sporadyczne przypadki błędów projektowych, powstać może konferencja „Dobre Projekty", wyróżniająca opracowania pozbawione istotnych błędów.

Literatura

1. Hulimka J., Skwarek M.: Ekspertyza techniczna. Ocena poprawności wykonania projektu wykonawczego konstrukcji stalowej. Rozbudowa zakładu, budowa hali magazynowo – produkcyjnej wraz z przynależną infrastrukturą techniczną. Zabrze, 2009.
2. PN-B-03200: 1990: Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 1990.
3. PN-91/M-06503: Dźwignice. Grupy natężenia pracy dźwignic i ich mechanizmów. Polski Komitet Normalizacji, Miar i Jakości, Warszawa, 1991.
4. PN-86/B-02005: Obciążenia budowli. Obciążenia suwnicami pomostowymi, wciągarkami i wciągnikami. Polski Komitet Normalizacji, Miar i Jakości, Warszawa, 1986.
5. Żmuda J.: Projektowanie torów jezdnych suwnic i elektrowciągów, Wydawnictwo TiT, Opole, 1997 r.