

Błędne rozwiązanie konstrukcyjne stalowego stropu pod maszyny wirujące

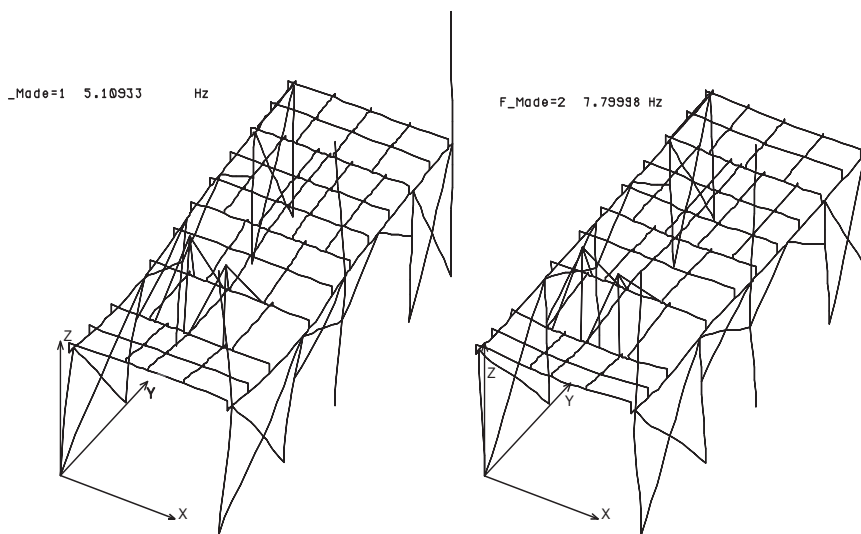
Dr hab. inż. Jakub Marcinowski, Uniwersytet Zielonogórski

1. Wprowadzenie

W lekkich konstrukcjach stalowych, smukłych w swej naturze, stosunkowo łatwo jest wzbudzić drgania. Względnie mała masa konstrukcji, duża smukłość elementów wsporczych, niewielka sztywność postaciowa rusztów stropów, niewielkie tłumienie, wszystko to sprzyja drganiom takich konstrukcji bez względu na to jakie źródło je wywołuje. Wymienione względy sprawiają, że konstrukcje stalowe nie są zalecane jako konstrukcje wsporcze pod maszyny [3, 4]. Mimo to, w praktyce inżynierskiej często spotyka się stalowe konstrukcje wsporcze pod maszyny nawet o najwyższej, czwartej kategorii dynamicznej.

Referat dotyczy analizy dynamicznej stalowej hali przemysłowej, na stropach której zlokalizowano wiele urządzeń generujących drgania. Urządzenia te to mieszalniki wirujące poziomo lub pionowo z różną prędkością obrotową.

W trakcie eksploatacji nowo zbudowanej hali przemysłowej stwierdzono nadmierne drgania belek stropu i tęczników hali. Drgania te pojawiały się podczas pracy urządzeń wirujących zamontowanych na stropie. Ich intensywność zależała od gęstości surowca podawanego do mieszalników (granulatu) i była największa dla granulatów najcięższych. Formy i intensywność drgań zmieniały się podczas zmian prędkości obrotowej mieszalników. Względy technologiczne wymagały by mieszalnik pracował ze zmienną prędkością obrotową, przy czym poszczególne fazy trwały nawet kilka minut.



Rys. 1. Dwie pierwsze formy drgań swobodnych stropu przed rekonstrukcją

W pewnych fazach pracy mieszalnika drgania nasilały się znacznie przybierając formę rezonansu o amplitudach tak dużych, że pracownicy znajdujący się na stropie mieli problemy z utrzymaniem równowagi. Smukłe tęczniki krzyżowe drgały z amplitudą 2–5 cm. Silne drgania występowały także w elementach zamontowanych w znacznej odległości od źródła drgań.

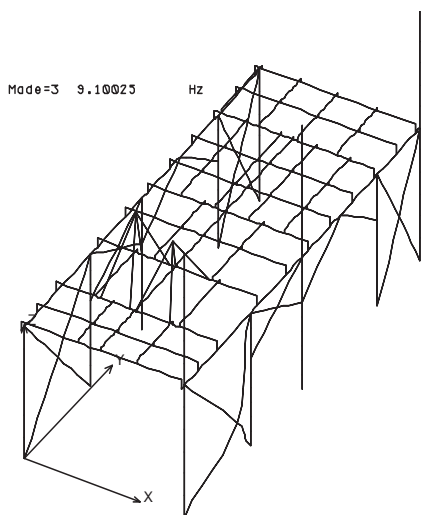
Oczywistym jest, że drgania o takim nasileniu są niedopuszczalne tym bardziej, że mieszalniki pracują w trybie ciągłym, na który składają się etapy podania surowca, wirowania w mieszalniku zimnym, wirowania w mieszalniku gorącym i wysypywania gotowego produktu. Stwierdzone drgania wywierają szkodliwy wpływ na konstrukcję i ludzi pracujących w hali, a przy intensywności, jaka zdarza się w pewnych okolicznościach stanowi wręcz poważne zagrożenie dla

konstrukcji stropu i ludzi pracujących w hali.

Przedmiotem referatu są szczegółowe obliczenia dynamiczne, których celem było ustalenie przyczyn nadmiernych drgań. Celem głównym była taka modyfikacja konstrukcyjna stropu by w efekcie uzyskać maksymalną redukcję drgań wywołanych pracą maszyn wirujących ustawionych na stropie.

2. Opis konstrukcji hali

Hala stalowa, została zaprojektowana i wzniesiona w 2005 roku. Jest halą typu lekkiego i została zaprojektowana jako dobudowa do istniejących, ceglanych obiektów zakładowych. Na główny ustrój nośny hali składają się słupy, belki oraz kratownicowe wiązary dachowe. Stropy wykonano w układzie słupów, podciągów i belek (rodzaj rusztu belkowego) pokrytych



Rys. 2. Trzecia forma drgań swobodnych stropu przed rekonstrukcją

kratą pomostową (krata Wema). Nierównomierny rozstaw słupów podpierających stropu wynikał z potrzeb technologicznych.

Ściany osłonowe oraz pokrycie dachu wykonano z płyt warstwowych typu PREKON-TERMOPLUS o dobrych właściwościach izolacyjnych.

Na stropach ażurowych rozmieszczono urządzenia technologiczne. Urządzenia stanowiące główne źródło drgań zlokalizowano na stropie 4,50 m. Na stropach dodatkowych podestach (poziom ok. 9 m) zlokalizowano wagi automatyczne, które nie wywołują obciążeń dynamicznych i stanowią istotny element w całym ciągu technologicznym

otrzymywania surowców do ekstrakcji elementów wykończonych wykorzystywanych w budownictwie.

3. Charakterystyka dynamiczna maszyn

Maszyny stanowiące główne źródło drgań mechanicznych zlokalizowano na stropie 4,50. W części pierwszej stropu (na prawo od osi H-H) jest to zespół mieszalników gorącego i zimnego. Każdy z nich jest napędzany niezależnym silnikiem elektrycznym. Mieszalnik zimny wiruje poziomo (oś obrotu równoległa do płaszczyzny stropu i prostopadła do belek podpierających), natomiast mieszalnik gorący – pionowo (oś obrotu prostopadła do płaszczyzny stropu). Prędkość wirowania mieszalnika zimnego jest stała i wynosi 750 obr/min (12,5 Hz). Mieszalnik gorący wiruje z prędkością zmienną od 59 do 590 obr./min. (0,983 ÷ 9,83 Hz). Całkowita masa zespołu mieszalników wynosi 7700 kg. Zespół obu mieszalników jest głównym źródłem drgań tego fragmentu konstrukcji hali. Na podstawie załącznika 1 Normy PN-80/B-03040 zaklasyfikowano te maszyny do III kategorii dynamicznej. Mamy bowiem do czynienia z maszynami wirującymi z pojemnikiem wypełnionym masą większą niż 100 kg i mniejszą niż 300 kg. Dla pewnych materiałów

masa ta może przekroczyć nawet 300 kg. W tych przypadkach kategoria dynamiczna maszyny jest IV, czyli najwyższa. Jest to równoznaczne z dużą dynamicznością maszyny lub nawet bardzo dużą w przypadku kategorii IV, (por. Załącznik 1 Normy PN-80/B-03040).

Norma PN-80/B-03040 narzuca w tym przypadku obowiązek uwzględnienia obciążeń dynamicznych w sprawdzaniu stanów granicznych nośności konstrukcji.

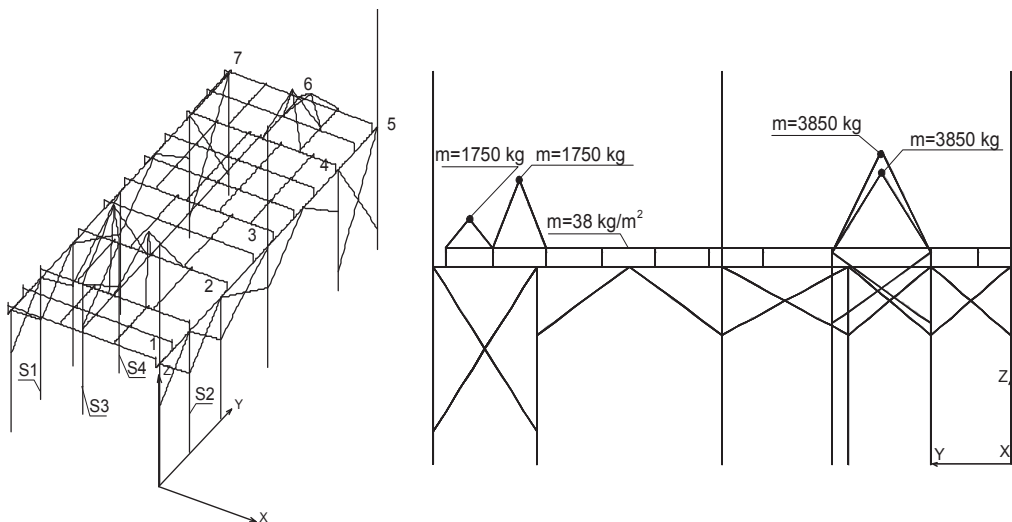
Maszyny pracują praktycznie w cyklu ciągłym. Drgania wywołane ich pracą są więc drganiami o charakterze stałym, albowiem czas ich trwania na pewno przekracza 30 min. w ciągu doby (por. p. 1.3.6. Normy PN-85/B-02170).

4. Model numeryczny i obliczenia stropu istniejącego

W modelowaniu numerycznym wykorzystano system COSMOS/M bazujący na metodzie elementów skończonych. Zamodelowano jedynie fragment rozległego stropu, fragment, na którym były zlokalizowane urządzenia stanowiące źródło drgań. Dane geometryczne do modelu numerycznego przyjęte zostały na podstawie dokumentacji projektowej i powykonawczej. Szczegółowo zamodelowano miejsca zakotwień elementów hali w ścianach hal ceglanych sąsiadujących z analizowaną halą.



Rys. 3. Modyfikacje konstrukcyjne stropu. Rozmieszczenie mas



W numerycznym modelu dynamicznym istotne jest rozmieszczenie mas. Na podstawie danych technologicznych poszczególnych urządzeń usytuowano masy skupione w miejscach w przybliżeniu odpowiadających lokalizacji środków ciężkości poszczególnych urządzeń.

Model obliczeniowy jest modelem prętowym, w którym wykorzystano elementy typu belkowego (beam3d w bibliotece sytemu COSMOS/M). Aby uwzględnić faktyczny układ osi prętowych elementów konstrukcyjnych zastosowano łączniki dystansowe, a do ich modelowania wykorzystano elementy typu RBAR. Te elementy wykorzystano także do przestrzennego rozmieszczenia mas skupionych odpowiadających poszczególnym fragmentom urządzeń. Trzecią grupą elementów wykorzystanych w modelu były elementy typu MASS.

Uwzględniono masy urządzeń oraz faktyczne ich położenie względem elementów konstrukcyjnych stropu. Masy te zostały zamocowane na szczytach sztywnych „piramid”, tak jak to wynikało z położenia środków mas urządzeń. Uwzględniono także ciężar własny konstrukcji oraz masy rozłożone odpowiadające masom krat pomostowych ułożonych na stropie.

Warunki podparcia zdefiniowano zgodnie ze stanem faktycznym wprowadzając więzi translacyjne i rotacyjne.

Wykonano obliczenia dynamiczne w zakresie częstotliwości i form drgań swobodnych konstrukcji stropu na poziomie 4,50 m.

W wyniku obliczeń otrzymano widmo częstotliwości drgań swobodnych pokazane w tabeli 1. Trzy pierwsze formy drgań swobodnych przedstawiono na rysunkach 1–2.

5. Modyfikacje konstrukcyjne

W ścisłej koordynacji z Projektantem hali, po rozpatrzeniu wielu

Tabela 1. Częstotliwości drgań swobodnych

L.p.	f_i [Hz]	Uwagi
1	5,10933	Forma suwna w kierunku x, Rys. 1
2	7,79998	Forma suwna w kierunku y, Rys. 1
3	9,10025	Drgania tężnika krzyżowego, Rys. 2
4	10,3464	Drgania skrętne w płaszczyźnie xy
5	12,3391	Lokalne drgania tężnika

wariantów, zaproponowano następujące modyfikacje konstrukcyjne (por. rys. 3), których celem była zmiana widma drgań swobodnych elementów konstrukcyjnych stropu. Wykorzystując sąsiedztwo budynku monolitycznego zakotwiono punkty 1–5 na kierunku x. Lokalizacje kotwi pokazano na rysunku 3. Każda z kotew powinna przenieść siłę 10 kN.

W punktach 5, 6 i 7 zaproponowano kotwie na kierunku y, a w punkcie 6 zalecono dodatkowo zakotwienie także na kierunku pionowym. Ostatnia belka IPE-330 rusztu stropowego powinna być podparta w tym miejscu. Wspornik podpierający tę belkę powinien przenieść siłę co najmniej 10 kN.

Zaproponowano ponadto cztery dodatkowe słupy S1÷S4 (por. rys. 3). Wszystkie słupy o przekroju HEB-240 powinny być sztywno mocowane w stopach fundamentowych i sztywno łączone z pasem dolnym odpowiednich belek rusztu. By wyeliminować drgania tężników zaproponowano modyfikację zmieniającą ich długość. Tężniki krzyżowe, długie należy zmodyfikować w taki sposób, by wysokość tężnika nie przekraczała 3400 mm (por. rys. 3).

Po tych modyfikacjach widmo drgań swobodnych elementów stropu zostało radykalnie zmienione. Dwie pierwsze formy drgań dotyczą lokalnych drgań tężników krzyżowych ($f_1 = 14,45$ Hz, $f_2 = 15,61$ Hz). Forma trzecia jest pierwszą formą drgań całego stropu. Pokazano ją na rysunku 4, a odpowiada jej częstotliwość jest równa $f = 19,38$ Hz. Wobec maksymalnej częstotliwości wymuszającej 9,83 Hz, drgania stropu nie wystąpią. Wszystkie tężniki po przekonstru-

waniu wykazują częstotliwości drgań swobodnych rzędu 15 Hz. Nie dojdzie zatem do ich wzbudzenia.

Po zaproponowanych modyfikacjach konstrukcyjnych konstrukcja wsporcza pod maszyny spełnia warunki strojenia wysokiego. Ani w fazie rozruchu, ani w fazie eksploatacji nie dojdzie do wzbudzenia drgań o zbyt dużej intensywności.

6. Uwagi końcowe

Przeprowadzone obliczenia dynamiczne stropu po modyfikacjach konstrukcyjnych, potwierdzają trafność przyjętych rozwiązań. Strop w żadnym swym fragmencie nie będzie wykazywał drgań wpływających na bezpieczeństwo konstrukcji i komfort pracy pracujących w hali ludzi. Mogą się pojawiać chwilowe wzbudzenia elementów drugorzędnych w części drugiej stropu, ale nie będą to drgania szkodliwe dla konstrukcji i odczuwalne dla pracowników.

Zaproponowana koncepcja modyfikacji konstrukcyjnych została zrealizowana. Strop zachowuje się bardzo stabilnie we wszystkich fazach pracy mieszalników i dla wszystkich stosowanych granulatów.

LITERATURA

- [1] COSMOS/M, Finite Element Analysis System, Version 2.9, Structural Research and Analysis Corporation, Electronic Manual, Los Angeles, California, 2002
- [2] Kisiel I., Dynamika fundamentów pod maszyny, PWN, Warszawa, 1957
- [3] Lipiński J., Fundamenty pod maszyny, Arkady, Warszawa, 1985
- [4] PN-80/B-03040 – Fundamenty i konstrukcje wsporcze pod maszyny
- [5] PN-90/B-03200 – Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie