



Problemy projektowania i analizy struktury regałów wysokiego składowania

RAFAŁ DALEWSKI, JERZY JACHIMOWICZ*

Mago S.A., Rusiec, 05-830 Nadarzyn, Al. Katowicka 119/121,
*Instytut Lotnictwa, 02-256 Warszawa, Al. Krakowska 110/114

Streszczenie. Praca zawiera wstępny opis projektowania konstrukcji cienkościennych pełniących rolę filarów konstrukcji regałowych i ich połączeń z pozostałymi elementami konstrukcji. Omówione zostały aspekty wyznaczania nośności konstrukcji w zależności od występujących postaci zniszczenia — wyboczenia lokalnego, dystorsyjnego i globalnego elementów konstrukcji, uplastycznienia.

Słowa kluczowe: MES, projektowanie konstrukcji, konstrukcje cienkościenne

Symbole UKD: 624.074

1. Wstęp

Szacunkowa wartość europejskiego rynku regałów (kwoty kontraktów za ostatni rok) to sumy rzędu 500 milionów euro. Zdobywanie dobrej pozycji na tym rynku jest uzależnione od dobrego produktu — zaproponowania rozwiązania systemowego najkorzystniejszego w swojej klasie i najlepiej realizującego potrzeby klienta. Potrzeby te są uzależnione zarówno od wymiarów i masy dystrybuowanych dóbr oraz konieczności uwzględnienia specyficznych potrzeb ich składowania (warunki przechowywania i własności fizyczne towarów), jak i dążenia do optymalizacji przestrzeni magazynowej. Ze względu na dużą różnorodność konstrukcji trudno jest przyjąć ogólną definicję regału magazynowego, jednak dla najczęściej spotykanych konstrukcji można przyjąć definicję określającą regał magazynowy jako przestrzenny układ składający się z pionowych słupów połączonych w ramy stężeniami i poziomymi trawersów łączących ze sobą kolejne, ustawiane w ciągach ramy (rys. 1 i 2). Składowanie na takiej konstrukcji odbywa się na parach trawer-



Rys. 1. Regały magazynowe (fotografie): a) paletowy; b) wjezdny

sów (lub szyn) pomiędzy kolejnymi ramami i następnym poziomem trawersów w podstawowej przestrzeni ładunkowej zwanej gniazdem.

Podstawowa klasyfikacja regałów wyróżnia następujące konstrukcje:

- statyczne
 - paletowe,
 - wjezdne,
 - dłużycowe;
- dynamiczne
 - przesuwne,
 - przepływowe,
- automatycznego składowania.

W artykule omówione zostaną pokrótce zagadnienia dotyczące projektowania konstrukcji statycznych regałów paletowych.

2. Projektowanie

Regały magazynowe projektuje się zgodnie z normami branżowymi (po wprowadzeniu nowej ustawy o zgodności europejskiej nie jesteśmy zobligowani do stosowania jednej, określonej normy krajowej).

Wytyczne FEM 10.2.02 „Projektowanie stalowych regałów magazynowych” — dokument wydany przez Europejskie Stowarzyszenie Wytwórców Sprzętu Magazynowego — Sekcje X „Sprzęt i procedury magazynowania” (oparta na

przednormie Eurocode 3). Wytyczne mają zostać przyjęte do końca 2006 roku jako norma europejska.

Stosuje się także RAL RG 614 (Niemcy) VLB Stowarzyszenia techniki magazynowej i urządzeń przemysłowych (norma oparta na normie budowlanej DIN 18800 i normie FEM 10.2.02).

Oprócz nich stosowane są normy krajowe: PN-M-78321 — Polska, odwołująca się niemal całkowicie do normy budowlanej PN-B-03200, ANSI MH 16.1 — amerykański odpowiednik FEM, opracowany przez RMI — Instytut Producentów Regalów, sekcje regałowa Amerykańskiego Stowarzyszenia Logistyków, NEN 5052 — Holandia.

3. Obciążenia

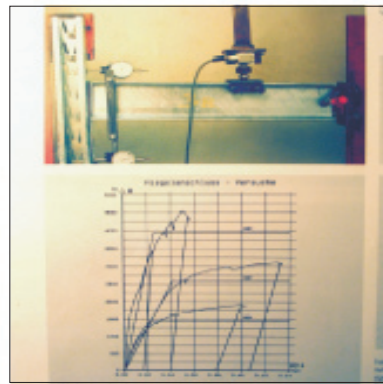
W projektowaniu i analizach regalów przyjmuje się następujące obciążenia (rys. 2):

1. Obciążenia masą własną.
2. Obciążenia użytkowe — ciężar składowanych towarów, oddziaływania pochodzące od urządzeń do obsługi regalów i innych urządzeń trwale połączonych ze strukturą.
3. Pionowe i poziome obciążenia od załadunku.
4. Obciążenia od niedoskonałości (imperfekcji).
5. Obciążenia udarowe.
6. Obciążenia naturalne (wiatr, trzęsienia ziemi).

a)



b)

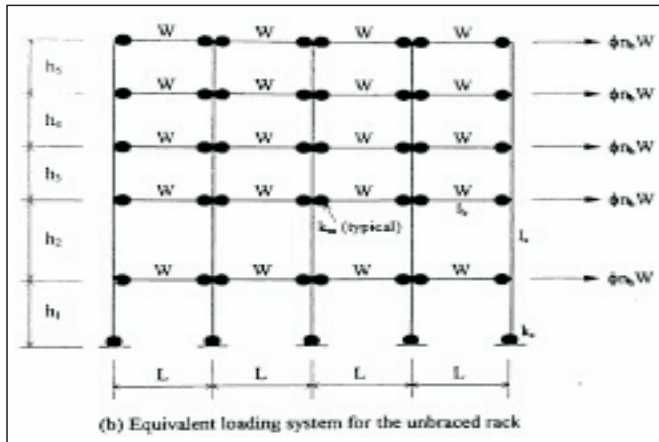


Rys. 2. Fotografia węzła konstrukcyjnego (a) oraz typowy przebieg próby zginania fragmentu trawersu (b)

4. Metody analizy

Analiza konstrukcji regału magazynowego składa się ze:

1. Stworzenia modelu prętowego z węzłami podatnymi dla określonych kombinacji układów obciążeń (jeden z nich pokazany poniżej). Efektem rozwiązania modelu jest określenie rozkładu sił i momentów w poszczególnych prętach.



Rys. 3. Typowy schemat obliczeń konstrukcji jako układu prętowego

2. Sprawdzenia warunku nośności użytkowej elementów oraz konstrukcji dla obciążeń otrzymanych z rozwiązania modeli prętowych. Nośność elementów regału jest określana głównie w oparciu o wynik badań. Zasadniczy wpływ na prowadzenie analizy konstrukcji regału ma określenie sztywności, nośności oraz luzu montażowego w pojedynczym węźle konstrukcji łączącym ze sobą słupy i trawersy regału. Nośność, sztywność i luz złącza są określane w badaniu zginania fragmentu trawersu.

5. Problemy projektowe

Silne uzależnienie projektowania od badań powoduje, że zasadniczy wpływ na dobór parametrów geometrycznych i materiałowych elementów regału ma doświadczenie konstruktora, **które znajduje lub nie potwierdzenie w badaniach elementów prototypowych i obciąża proces poszukiwania najlepszych rozwiązań.** Tego typu zadania stanowią doskonałe pole do badań z wykorzystaniem metod modelowania numerycznego MES zarówno na etapie projektowania, wczesnego prototypowania, jak i kolejnych etapów cybernetycznego modelu rozwiązywania zadania.

a) Stateczność elementów konstrukcji

W wypadku regałów sklepowych spotykamy się ze wszystkimi postaciami utraty stateczności niemal wszystkich elementów konstrukcji. Nogi (ramy) — słupy — element konstrukcji najbardziej narażony na utratę stateczności. Ponieważ słupy regałów magazynowych to najczęściej cienkościennie kształtowniki o profilu otwartym z gęstą siecią otworów montażowych dla trawersów, ale również i stężeń oraz innych elementów systemu, są one narażone, w zależności od swoich wymiarów charakterystycznych, na większość lub wszystkie postaci utraty stateczności. Krótkie odcinki — wyboczenie lokalne lub postaciowe. Odcinki równe jednej podziałce stężeń — wyboczenie postaciowe, giętno-skrętne, skrętne lub ogólne. Ramy (słupy o dużej smukłości) — wyboczenie postaciowe dla wyższych wartości własnych oraz wyboczenie ogólne. Ramy — stężenia — najczęściej postać giętno-skrętna. Trawersy jako zginane elementy belkowe są narażone na zwichrzenie, jednak ze względu na działanie dużych obciążeń skupionych lub ciągłych na krótkich odcinkach dochodzić może do lokalnej utraty stateczności środka.

b) Połączenia

Określenie sztywności oraz nośności złącza zaczepowego (rys. 2) na etapie projektowania, w szczególności z uwzględnieniem pełnego zakresu pracy — z lokalnymi uplastycznieniami i utratą stateczności, jest trudne z racji nieliniowości występującej niemal w całym zakresie pracy połączenia. Sztywność złącza zależy zarówno od sztywności każdego z elementów, jak i sztywności wspólnej połączenia zależnej od skuteczności zazębienia połączenia — najprostszym sposobem ustalenia tych danych jest przeprowadzenie badań, co z kolei utrudnia projektowanie bez prototypów, a więc oparte na samych obliczeniach. Dodatkową trudność stanowi fakt, że sztywność złącza zależy również od wysokości użytej belki i innych parametrów geometrycznych złącza, co stwarza konieczność prowadzenia badań dla wszystkich kombinacji elementów, które pojawiają się w projektowaniu konstrukcji.

c) Stateczność ogólna

Regały jako konstrukcje systemowe — składające się z dużej liczby współpracujących ze sobą w różnych pozycjach elementów różnego typu — dają możliwość tworzenia olbrzymiej liczby (teoretycznie rzecz biorąc — nieskończonej) praktycznych kombinacji przestrzeni ładunkowych projektowanych dla różnych obciążeń i różnego typu składowanych towarów. Dla każdej z nich projektant powinien sprawdzić warunki stateczności ogólnej i ewentualnie zaproponować metody zwiększenia sztywności konstrukcji, określając w tym celu obciążenia dodatkowych elementów i podpór. Do tego celu doskonale nadają się systemy obliczeniowe oparte na metodzie elementów skończonych (MES).

d) Niedokładności wykonania

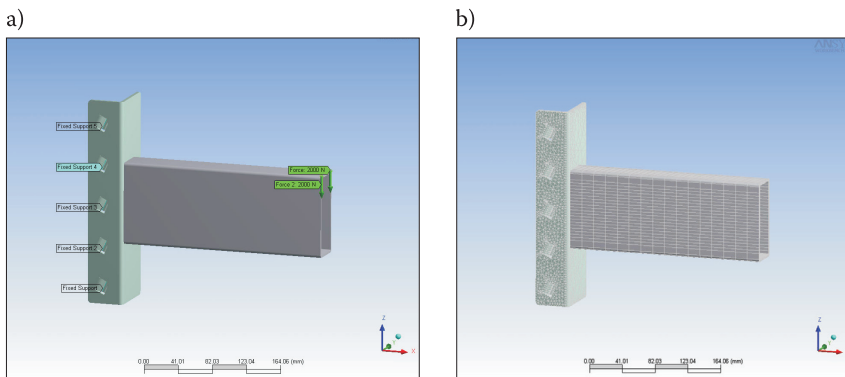
W projektowaniu konstrukcji regałowych największe znaczenie mają niedokładności wynikające z wykonania słupów regału (perforacja, wymiary, profil). Wpływają one na jakość montażu — a w konsekwencji na sztywność ramy i na obciążenia działające w jej płaszczyźnie, sztywność połączenia słupa i trawersu oraz szereg innych elementów i węzłów konstrukcji.

6. Technologia

Głównym zabiegiem technologicznym w produkcji elementów regałów magazynowych jest gięcie na zimno na prasach rolkowych. Stosuje się także formowanie na prasach (wykrawanie, tłoczenie), spawanie oraz inne podstawowe zabiegi technologiczne. W konsekwencji gięcia na zimno profile są miejscowo umacniane, a wielkość tego umocnienia z reguły nie jest uwzględniana w przyjętym do obliczeń modelu materiału. Dodatkowo dokładność wykrawania i przemieszczanie się otworów w wyniku innych zabiegów technologicznych mają wpływ na imperfekcje montażowe.

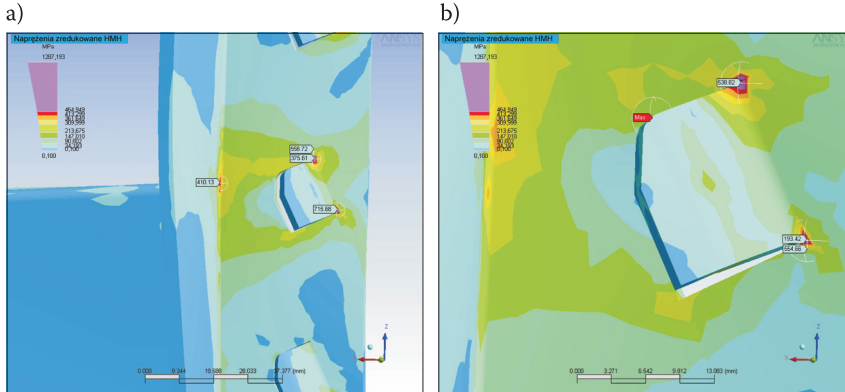
7. Model obliczeniowy

Jednym z ciekawszych problemów modelowych, a zarazem konstrukcyjnych, jest opis połączenia zaczepowego trawersu ze słupem. Na ilustracjach został pokazany przykład modelowania próby zginania zaczepu — deformacja i naprężenia w zaczepie. Przeprowadzenie pełnej symulacji takiego modelu wymaga prawidłowego określenia geometrii, przygotowania bryły, właściwego przeformowania zaczepów i precyzyjnego określenia kontaktu.

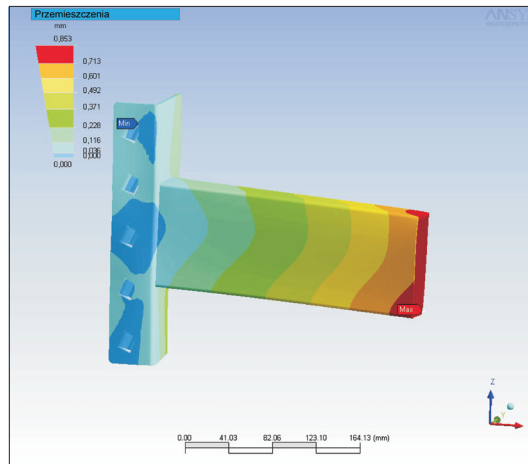


Rys. 4. Model węzła konstrukcyjnego: a) fragment poddawany badaniom; b) model obliczeniowy

Przedstawione wyniki analizy stanowią wycinek modelu całego badania w ujęciu uproszczonym.



Rys. 5. Naprężenia zredukowane (wg hipotezy Hubera) w zaczepie trawersu: a) widok ogólny; b) powiększenie w strefie największych naprężeń



Rys. 6. Mapa przemieszczeń dla trawersu

8. Wnioski

Rozwiązanie modelu węzła metodą elementów skończonych jako zagadnienia liniowego nie daje możliwości przeprowadzenia pełnej symulacji badania zginania trawersu. W celu pełnego przeanalizowania tej próby konieczne jest uwzględnienie interakcji wszystkich elementów konstrukcji, a więc odpowiednie zamodelowanie kontaktu wraz z uplastycznieniami w strefie kontaktu. Określenie procedury roz-

wiązywania tego zagadnienia jest jednak niezwykle cenne, głównie dla potrzeb projektowania nowych rozwiązań konstrukcyjnych, gdyż ogranicza konieczność przygotowywania dużej liczby prototypów we wczesnej fazie opracowywania konstrukcji.

Artykuł wpłynął do redakcji 16.02.2006 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w czerwcu 2006 r.

LITERATURA

- [1] FEM 10.2.02, *Projektowanie stalowych regałów magazynowych*, FEM Sekcja X.
- [2] Handbuch Lagertechnik und Betriebseinrichtung VDE.

R. DALEWSKI, J. JACHIMOWICZ

Problems of design and analysis of a structure of racking uprights

Abstract. The paper presents preliminary study of thin-walled designs employed in racking uprights. Also the joints of these constructions with other elements are described here. The authors describe some aspects of determination of construction strength regarding various modes of buckling and plasticity.

Keywords: FEM, structural design, thin-walled construction

Universal Decimal Classification: 624.074