



POLITECHNIKA WROCŁAWSKA
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA LĄDOWEGO I WODNEGO

ANTONI BIEGUS

PROJEKTOWANIE STĘŻEŃ
STALOWYCH BUDYNKÓW HALOWYCH

WYKŁADY

www.kkm.pwr.wroc.pl



WROCŁAW 2012

SPIS TREŚCI

PRZEDMOWA	3
1. KSZTAŁTOWANIE STĘŻEŃ STALOWYCH BUDYNKÓW HALOWYCH	4
1.1. Budowa strukturalna i kształtowanie szkieletu nośnego hal stalowych	4
1.2. Kształtowanie stężeń hal stalowych	8
1.2.1. Wprowadzenie	8
1.2.2. Stężenia połączeniowe poprzeczne dachów hal	11
1.2.3. Stężenia połączeniowe podłużne dachów hal	15
1.2.4. Stężenia pionowe podłużne kratowych dachów hal	18
1.2.5. Pionowe stężenia podłużne słupów hal	21
1.2.6. Stężenia poziome ścian szczytowych i podłużnych	24
2. WYZNACZANIE SIŁ WEWNĘTRZNYCH W STĘŻENIACH	26
2.1. Wprowadzenie	26
2.2. Obliczenia statyczne stężeń połączeniowych poprzecznych	27
2.3. Obciążenie imperfekcyjne poziomych stężeń poprzecznych dźwigarów	29
2.3.1. Jednoprzęsłowe poprzeczne stężenia połączeniowe dźwigarów dachowych ..	29
2.3.2. Reakcje podporowe połączeniowych stężeń poprzecznych	33
2.3.3. Wspornikowe stężenia poprzeczne dźwigarów dachowych	35
2.3.4. Wieloprzęsłowe stężenia poprzeczne dźwigarów dachowych	36
2.3.5. Obliczanie stężeń prętowych i tarczowych	39
2.4. Obliczenia statyczne stężeń połączeniowych podłużnych	42
2.5. Obliczenia statyczne pionowych, podłużnych stężeń dachów kratowych	44
2.6. Obliczenia statyczne pionowych stężeń podłużnych słupów hal	46
2.7. Obliczenia statyczne stężeń wiatrowych ścian	51

PRZEDMOWA

W ciągu minionych 30 lat nastąpiły istotne zmiany w stosowaniu, wytwarzaniu, a zwłaszcza w projektowaniu stalowych hal. Rozwój i postęp tej dziedziny budownictwa był możliwy dzięki poszerzeniu stanu wiedzy o podstawach naukowych konstrukcji stalowych i wprowadzeniu znaczących zmian technologicznych ich wytwarzania.

W dziedzinie podstaw naukowych projektowania konstrukcji stalowych wyjaśniono i uściślono wiele zagadnień dotyczących identyfikacji ich modeli obliczeniowych, a współczesna technika komputerowa umożliwia dokładniejszą niż dawniej analizę rzeczywistego zachowania się i oceny nośności ustroju. Między innymi w ostatnich latach 20 wieku wyjaśniono pracę oraz zidentyfikowano modele obliczeniowe stężeń dachowych i ściennych stalowych budynków halowych. Są to tzw. „modele imperfekcyjne”, które należy stosować zgodnie z Eurokodem 3.

Głównym układem nośnym hali jest szkielet składający się z poprzecznych ustrojów (ram) nośnych, połączonych ze sobą i usztywnionych stężeniami. Każda konstrukcja nośna budynku musi spełniać warunki geometrycznej niezmienności ustroju w przestrzeni trójwymiarowej. Na budynek hali działają obciążenia pionowe (od ciężaru własnego, śniegu, suwnic) oraz poziome prostopadłe i równoległe do osi podłużnej obiektu (od wiatru, suwnic, temperatury). Ustroje poprzeczne i stężenia (tworzące razem ustrój geometrycznie niezmienny w przestrzeni trójwymiarowej) są jednakowo ważnymi elementami konstrukcji nośnej hali, gdyż przejmują one wspólnie wielokierunkowe obciążenia działające na obiekt. Analiza geometrycznej niezmienności konstrukcji jest podstawowym zadaniem projektanta w kształtowaniu głównego ustroju nośnego hali. Zadanie to nie jest łatwe szczególnie w nietypowych sytuacjach projektowych. Układ geometryczny, rozmieszczenie i rodzaj tężników zależy od indywidualnych sytuacji projektowych, np. rodzaju rygla dachowego (kratowy, pełnościenny), rozpiętości nawy, rozstawu ram, obciążeń technologicznych itp.

W wykładach zwrócono szczególną uwagę na wyjaśnienie i identyfikację modeli fizycznych i obliczeniowych projektowania stężeń budynków halowych. Ich wiodącym założeniem jest prezentacja przesłanek uzasadniających podstawy przyjmowania w projektowaniu stężeń rozstrzygnięć w kształtowaniu obiektu, jego obliczania i konstruowania. Rozumienie funkcji statycznej i wytrzymałościowej stężeń, a także modeli szacowania ich nośności jest podstawą do racjonalnego korzystania z programów komputerowych i optymalnego projektowania budowli.

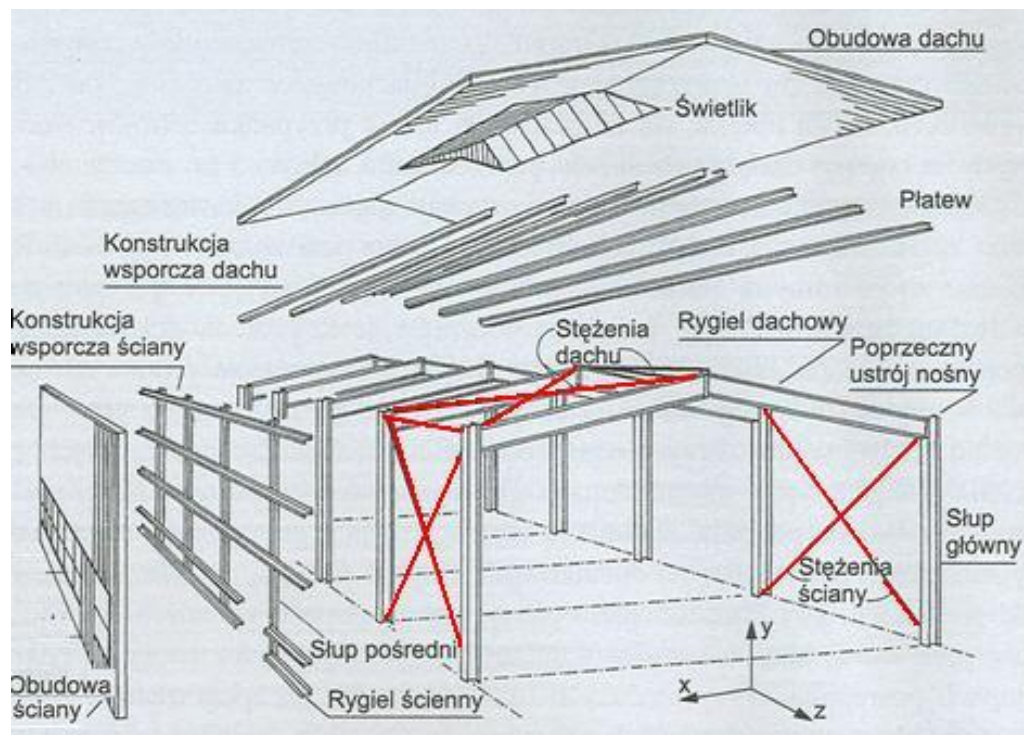
1. KSZTAŁTOWANIE STĘŻEŃ STALOWYCH BUDYNKÓW HALOWYCH

1.1. Budowa strukturalna i kształtowanie szkieletu nośnego hal stalowych

Halami nazywamy budynki parterowe jedno- lub wielonawowe, najczęściej niepodpiwniczone, których cechą charakterystyczną jest brak wewnętrznych ścian poprzecznych i podłużnych. W takich obiektach dach i zewnętrzne ściany zamykają pewną przestrzeń chroniąc dużą powierzchnię użytkową przed wpływami atmosferycznymi (śniegiem, deszczem, wiatrem, temperaturą, pyłem itp.). Niektóre fragmenty hal parterowych mogą być ukształtowane jako wielokondygnacyjne.

Pełnienie założonej funkcji technologicznej (produkcyjnej, eksploatacyjnej) oraz ochrony wnętrza przed wpływami otoczenia ma zasadniczy wpływ na budowę strukturalną i rodzaj ustroju nośnego budynku halowego. Wymagania odnoszące się do przegród (ich izolacyjności cieplnej, wilgotnościowej, akustycznej), oświetlenia i wentylacji, urządzeń transportowych, wyposażenia ochrony przeciwpożarowej, a także realizacja założonej funkcji obiektu, wpływają bezpośrednio na przyjmowane rozwiązania konstrukcyjno-materiałowe hali i jej poszczególnych elementów składowych.

Schemat budowy strukturalnej stalowego budynku halowego pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Schemat budowy strukturalnej stalowego budynku halowego

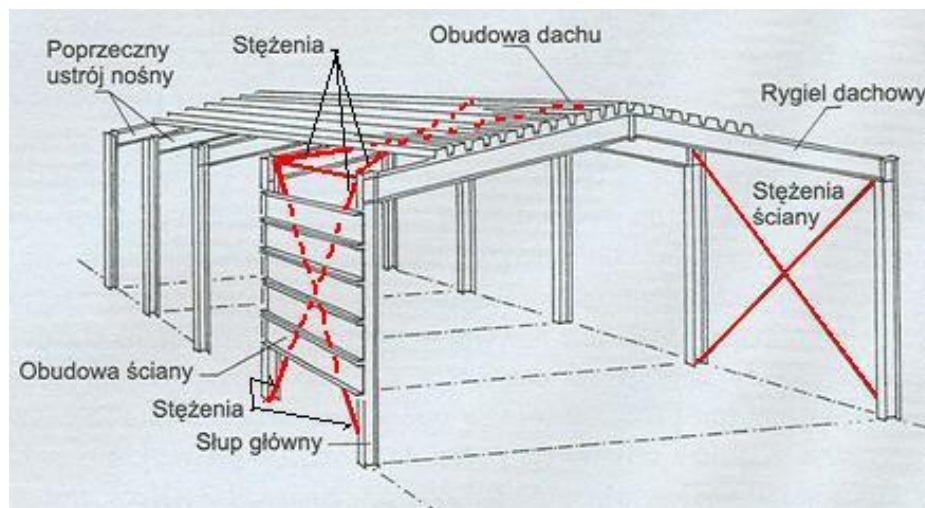
W schemacie tym zestawiono typowe elementy takich obiektów w celu przedstawienia ich roli konstrukcyjnej lub związanej z wymaganiami użytkownika obiektu. Jest rzeczą oczywistą, iż przedstawione na rys. 1 elementy mogą mieć wiele rozwiązań wariantowych. Dlatego rysunek ten należy traktować jako schemat ideowy. Wyróżniono w nim elementy osłonowe dachu i ścian, ich konstrukcję wsporczą oraz główny ustrój nośny, w skład którego wchodzi poprzeczne układy nośne oraz stężenia. Każdy z tych elementów ma spełniać określone zadanie konstrukcyjne lub funkcjonalne. Równocześnie stosuje się rozwiązania konstrukcyjne hal, w których elementy składowe pełnią podwójną funkcję, np. dachowe płyty fałdowe pełnią rolę osłonową i stężenia połączy dachu, płatwie są konstrukcją wsporczą płyt dachowych i równocześnie elementem nośnym stężenia.

Zadaniem obudowy ścian (podłużnych i szczytowych) oraz dachu jest zabezpieczenie wnętrza hali przed wpływami atmosferycznymi (śniegiem, deszczem, wiatrem, temperaturą, pyłem, hałasem itp.). Zasadniczymi elementami obudowy są płyty dachowe i ściennie, a także świetliki dachowe oraz okna, wrota i drzwi w ścianach. Te powierzchniowe elementy przejmują bezpośrednio obciążenia od śniegu i wiatru. Względy wytrzymałościowe sprawiają, iż wymagają one stosunkowo gęstej siatki linii podparć. Dlatego też najczęściej niezbędne jest zastosowanie konstrukcji wsporczej dla powierzchniowych elementów ścian i dachu.

Konstrukcją wsporczą płyt dachowych są zazwyczaj płatwie. Są to elementy usytuowane równolegle do osi podłużnej hali. Przejmują one obciążenia z płyt dachowych przekazując je na poprzeczne układy nośne. Ich rozstaw wynika z nośności płyt dachowych oraz np. rozmieszczenia węzłów górnych kratowego rygla układu poprzecznego. Świetliki dachowe, w zależności od konstrukcji, mogą opierać się na płatwiach lub w przypadku konstrukcji samonośnych na układach poprzecznych hali.

Zamocowanie okien, bram i drzwi wymaga najczęściej zastosowania w ścianach rygli. Wówczas konstrukcja wsporcza ścian jest słupowo-ryglowa. Rygle ściennie są poziomymi elementami prętowymi. Są one ułożone w stosunku do osi podłużnej hali: równolegle w ścianie bocznej i prostopadle w ścianie czołowej (poprzecznej). Ich zadaniem konstrukcyjnym jest przejęcie pionowych obciążeń od ciężaru własnego osłon ściennych i przekazywanych przez nie obciążeń poziomych od wiatru. Przy niedużych rozstawach układów poprzecznych rygle ściennie mogą opierać się na słupach głównych ustrojów nośnych. Częściej jednak (z uwagi na spełnienie wymagań stanu granicznego użytkowania) rygle ściennie opierają się na dodatkowych słu-

pach pośrednich. Można tu wyróżnić sytuację, gdy rygle ściennie opierają się na słupach głównych i pośrednich lub, jeśli ustrój słupowo-ryglowy ściany jest niezależną konstrukcją tylko na słupach pośrednich. W przypadku niedużych rozstawów układów poprzecznych i zastosowania elementów osłonowych o dużej nośności, płyty dachowe i ściennie mogą opierać się bezpośrednio na poprzecznych ustrojach nośnych i dodatkowa konstrukcja wsporcza ścian i dachów nie występuje. Na rys. 2 pokazano schemat konstrukcji hali, w której powierzchniowe elementy osłonowe dachu i ścian bocznych opierają się bezpośrednio na ramach poprzecznych. Jako płyty dachowe zastosowano stalowe blachy fałdowe tzw. trzeciej generacji, na ściany, kasety ściennie, w których układa się izolację termiczną. Wówczas wręgi (żebra) kaset ściennych pełnią rolę rygli, do których mocuje się zewnętrzną blachę fałdową.



Rys. 2. Schemat konstrukcji hali, w której elementy osłonowe dachu i ścian opierają się bezpośrednio na ramach poprzecznych

Obciążenia od ciężarów własnych obudowy i konstrukcji wsporczych dachu i ścian, a poprzez nie również obciążenia klimatyczne, przekazują się na główny ustrój nośny hali. Ustrój główny hali przenosi również często obciążenia wynikające z technologii produkcji lub eksploatacji obiektu (np. obciążenia od suwnic, wciągarek, temperatury itp.). W skład głównego ustroju nośnego hali wchodzi poprzeczne układy nośne oraz stężenia. Jego zadaniem jest zapewnienie wytrzymałości i stateczności elementom konstrukcji hali, a także sztywności niezbędnej do zapewnienia żądanych warunków eksploatacji obiektu. Należy w tym miejscu wyraźnie podkreślić konstruk-

cyjną rolę nie tylko płaskiego układu poprzecznego, ale również stężeń, co uzasadnia nazywanie ich głównymi ustrojami nośnymi. Mianem drugorzędnych nazywa się elementy konstrukcji hali, których usunięcie nie powoduje katastrofy budowli. Do takich elementów można zaliczyć elementy obudów i ich konstrukcji wsporczych, gdy są one niezależne od systemu stężeń szkieletu nośnego budynku.

Głównym układem nośnym hali jest, więc szkielet składający się z szeregu poprzecznych ustrojów (ram) nośnych, połączonych ze sobą i usztywnionych stężeniami. Ramy nośne składają się z rygli (pełnościennych lub kratowych) oraz podpierających je słupów (pełnościennych lub kratowych). Każda konstrukcja nośna budynku musi spełniać warunki geometrycznej niezmienności ustroju w przestrzeni trójwymiarowej. Na budynek hali działają obciążenia pionowe (od ciężaru własnego, śniegu, suwnic) oraz poziome prostopadłe i równoległe do osi podłużnej obiektu (od wiatru, suwnic, temperatury). Ustroje poprzeczne i stężenia (tworzące razem ustrój geometrycznie niezmienny w przestrzeni trójwymiarowej) są jednakowo ważnymi elementami konstrukcji nośnej hali, gdyż przejmują one wspólnie wielokierunkowe obciążenia działające na obiekt.

Analiza geometrycznej niezmienności konstrukcji jest podstawowym zadaniem projektanta w kształtowaniu głównego ustroju nośnego hali. Zadanie to nie jest łatwe szczególnie w nietypowych sytuacjach projektowych. Układ geometryczny, rozmieszczenie i rodzaj tężników zależy od indywidualnych sytuacji projektowych, np. rodzaju rygla dachowego (kratowy, pełnościenny), rozpiętości nawy, rozstawu ram, obciążeń technologicznych itp.

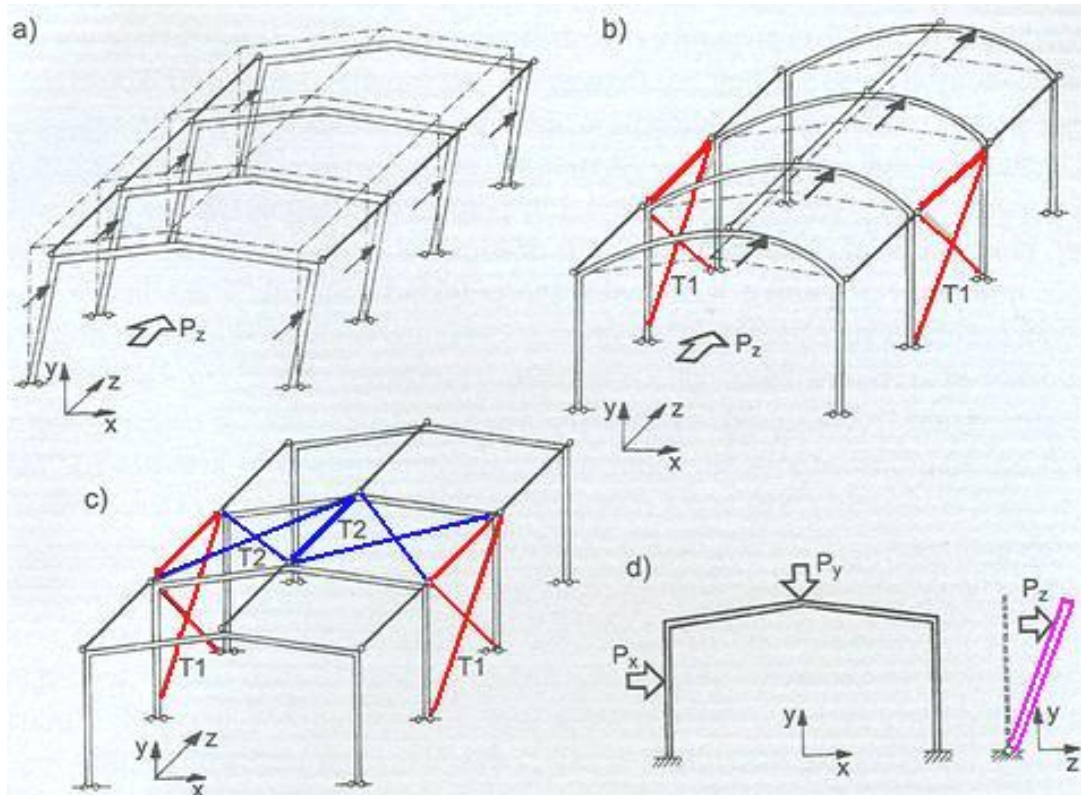
Geometryczną niezmienność hali pokazanej na rys. 1 w płaszczyźnie xy zapewniają ramy poprzeczne. Jest bowiem rzeczą oczywistą, że złożone ze słupów oraz rygli płaskie układy poprzeczne przyjmuje się jako geometrycznie niezmiennie w swej płaszczyźnie. Nie zapewniają one jednak sztywności podłużnej hali (w płaszczyźnie yz) oraz połączeń dachowej (w płaszczyźnie xz). Dlatego dla konstrukcji według schematu pokazanego na rys. 1 należy zastosować pionowe stężenia ścian (w płaszczyźnie yz) oraz poziome połączeniowe stężenia w płaszczyźnie dachu (w płaszczyźnie xz). Oprócz tych usztywnień konstrukcji hali mogą wystąpić inne typy stężeń (np. pionowe i poziome dachowych rygli kratowych, wiatrowe ścian szczytowych). Ponadto dla zapewnienia warunków pewnego i dogodnego montażu konstrukcji, stosuje się niekiedy stężenia montażowe. Obszerne omówienie zasad kształtowania stężeń hal podano w następnym rozdziale.

1.2. Kształtowanie stężeń hal stalowych

1.2.1. Wprowadzenie

Omawiając ogólną charakterystykę i budowę strukturalną hal wskazywano na konstrukcyjną rolę stężeń jako bardzo ważnego elementu nośnego, przestrzennego szkieletu budynku. Płaskie układy poprzeczne hal są samostateczne i wystarczająco sztywne w swej płaszczyźnie. Spełniają one warunek geometrycznej niezmienności oraz sztywności na obciążenia działające w ich płaszczyźnie (prostopadłe do osi podłużnej hali). W przeciwieństwie do układu poprzecznego, podłużne ustroje nośne hal są z reguły o węzłach i połączeniach przegubowych. Dotyczy to zarówno połączeń układów poprzecznych z fundamentami, jak i połączeń rygli dachowych i słupów głównych tychże z płatwiami i ryglami ściennymi.

Na rys. 3 pokazano konstrukcję hali o ramowych (pełnościennych) układach poprzecznych. Geometryczną niezmienność i sztywność budynku w płaszczyźnie xy zapewnia przyjęty schemat statyczny poprzecznych ustrojów nośnych hali (rys. 3d).



Rys. 3. Schematy analizy geometrycznej zmienności i sztywności ustroju nośnego hali

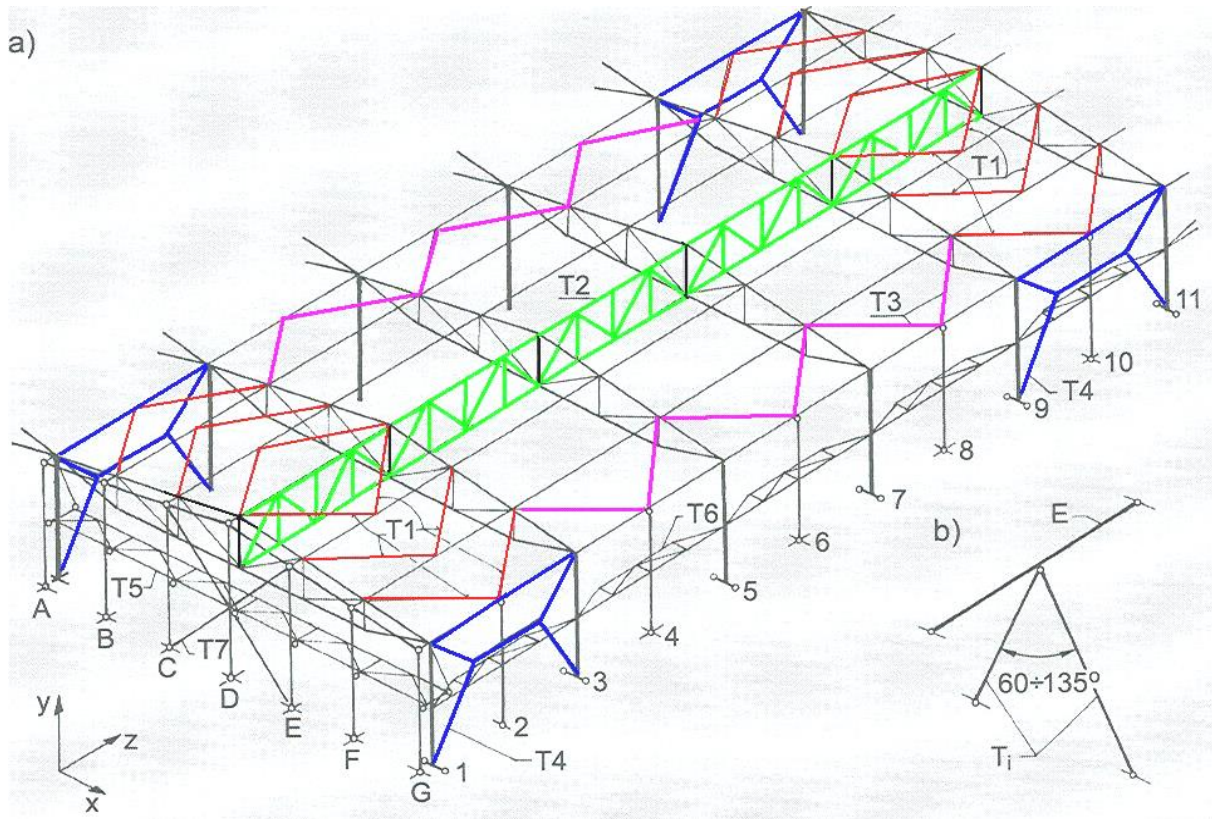
Przestrzenny ustrój nośny budynku halowego jest jednak geometrycznie zmienny w płaszczyźnie yz (podłużnych ścian bocznych - rys. 3a) oraz odkształcalny w płaszczyźnie xz (połaci dachowej hali - rys.3b). Dlatego też, dla zapewnienia geometrycznej niezmienności i sztywności całej konstrukcji zarówno w trakcie jej montażu jak i eksploatacji niezbędne jest zastosowanie odpowiednich stężeń T1 w płaszczyźnie ścian podłużnych i T2 w płaszczyźnie połaci dachu (rys. 3c).

Przedstawiona analiza ma charakter uproszczony i często dla uzyskania właściwej sztywności i stateczności konstrukcji należy dać dodatkowe stężenia. Taka sytuacja dotyczy np. hal z kratowymi ryglami dachowymi. Należy wtedy zastosować dodatkowe stężenia dźwigarów kratowych.

Zadaniem stężeń jest zapewnienie skutecznego przeciwdziałania zmianom kształtu i położenia elementów układu konstrukcyjnego obiektu (rys. 3a, b, d). Stateczność układu konstrukcyjnego musi być zapewniona w warunkach realizacji, eksploatacji, rozbudowie, remontach i demontażu konstrukcji. Sprawdzenie stateczności położenia polega na wykazaniu, że konstrukcja lub jej części, traktowana jako ciało sztywne, jest dostatecznie zabezpieczona przed przesunięciem, uniesieniem lub wywróceniem. Przez zastosowanie stężeń (nazywanych również tężnikami) we wszystkich płaszczyznach zamykających przestrzeń hali (w ścianach bocznych, szczytowych i dachu), tworzy się geometrycznie niezmienną konstrukcję (najczęściej tarczę prętową). Stężenia oprócz nadania stateczności całej konstrukcji lub jej elementom, przenoszą obciążenia poziome od wiatru i urządzeń transportowych w kierunku prostopadłym do płaszczyzny obciążeń nośnych układów poprzecznych hal. Uzyskuje się w ten sposób współdziałanie w przenoszeniu wytyżeń między różnymi częściami szkieletu nośnego w przestrzeni budynku (przestrzenne wytyżenie ustroju nośnego hali).

Stateczność i dostateczna nośność ustroju nośnego budowli powinna być zapewniona nie tylko dla fazy eksploatacji, ale również w trakcie jej transportu, montażu jak również podczas rozbudowy i remontu. Stąd też obok stężeń stałych stosuje się stężenia tymczasowe (np. na czas montażu konstrukcji). W halach o konstrukcji stalowej stosuje się najczęściej stężenia prętowe. Taką rolę usztywniającą mogą spełniać również tarcze betonowe, ceramiczne (stropy, ściany), a także obudowa ścian i dachów z kaset ściennych lub blachy falistej bądź fałdowej (rys. 1.27).

Na rys. 4a pokazano schemat konstrukcji nośnej hali z oznaczeniem poszczególnych rodzajów tężników.



Rys. 4. Rozmieszczenie stężeń w hali o konstrukcji stalowej (a): T1 – stężenie połączeniowe poprzeczne, T2 – stężenie pionowe podłużne dachu, T3 – stężenie połączeniowe podłużne, T4 – stężenie pionowe podłużne słupów, T5 – stężenie wiatrowe ściany czołowej, T6 – stężenie wiatrowe ściany podłużnej, T7 – stężenie pionowe ściany szczytowej oraz schemat podpierającej tarczy prętowej (b): T_i – pręty podpierające, E – element podpierany

W zależności od roli, jego kształtu i miejsca w konstrukcji hali rozróżnia się stężenia (oznaczone na rys. 4a jako T_i)

- dachowe:

- poziome poprzeczne (połączeniowe poprzeczne) T1,
- poziome podłużne (połączeniowe podłużne) T3,
- pionowe podłużne (międzywiązarowe) T2,

- ścienne:

- pionowe podłużne ściany bocznej (międzysłupowe) T4,
- pionowe poprzeczne ściany szczytowej T7,
- poziome podłużne ściany bocznej (wiatrowe) T6,
- poziome poprzeczne ściany szczytowej (wiatrowe) T5.

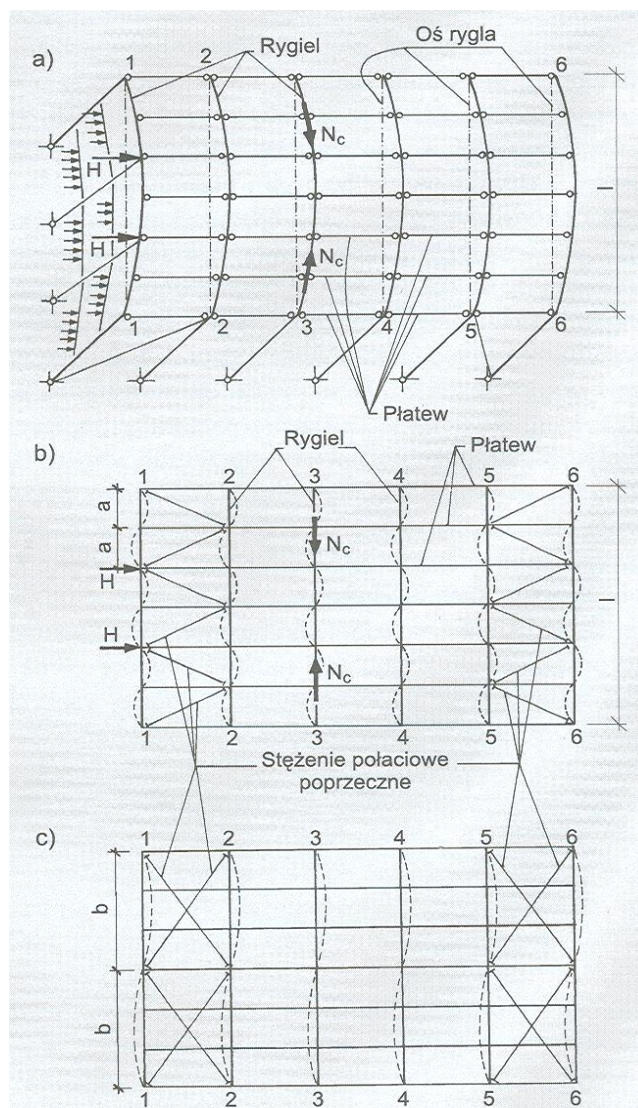
Dobór stężeń zależy od rozwiązań konstrukcyjnych ustroju nośnego oraz obciążeń hali. W związku z tymi nie wszystkie wymienione oraz pokazane na rys. 4a stężenia muszą być zawsze zastosowane. Rodzaj niezbędnych stężeń szkieletu nośnego hali ustala się na podstawie analizy geometrycznej niezmienności i sztywności budynku w płaszczyznach połączenia dachu oraz ścian podłużnych i szczytowych.

Element można uważać za nieprzesuwnie podparty w płaszczyźnie prostopadłej do swej osi, jeśli jest on połączony z tarczą (prętową lub pełnościenną), która ma zapewnioną stateczność. W przypadku tarcz prętowych T_i tworzą je co najmniej dwa pręty, których osie przecinają się na osi elementu podpieranego tworząc kąt w granicach od 60° do 135° (rys. 4b). Muszą one być połączone z punktami stałymi, które w wyniku działania obciążeń nie zmieniają swego położenia więcej niż o wartości granicznych dla nich przemieszczeń (ugięć, wychyleń, osiadań). Wymaga się ponadto, aby pręty podpierające oraz ich połączenia były o nośności większej od 0.01 maksymalnej siły w elemencie podpieranym (usztynianym).

1.2.2. Stężenia połączeniowe poprzeczne dachów hal

Stężenia połączeniowe poprzeczne dachów hal są poziomymi kratownicami umieszczonymi najczęściej między ryglami sąsiednich układów poprzecznych. Projektuje się je w celu przeniesienia sił poziomych od wiatru, działającego na ścianę szczytową i świetliki oraz od hamowania podwieszonych suwnic, a także sił od imperfekcji geometrycznych pasów rygli w płaszczyźnie dachu. Są to więc obciążenia prostopadłe do płaszczyzny układów poprzecznych, które działają w płaszczyźnie połączenia dachu.

Schemat wytyczenia połączenia dachu pokazano na rys. 5. Konstrukcja dachu składa się z rygli dachowych oraz połączonych z nimi przegubowo płatwi. Rygle dachowe są dźwigarami o dużej rozpiętości. Mała sztywność ich przekroju względem osi pionowej powoduje, iż połączyć dachu mogłaby się przemieszczać wzdłuż osi podłużnej hali (rys. 5a). W takiej sytuacji np. długość wyboczeniowa pasów rygli kratowych byłaby równa rozpiętości układu poprzecznego $l_{w2} = l$, gdyż płatwie przegubowo połączone z rygłem nie tworzą geometrycznie niezmienną poziomą tarczę. Taka sama sytuacja występuje również w dachach bezpłatwowych, gdy brak jest konstrukcyjnych połączeń płyt dachowych o odpowiedniej sztywności lub zastosowanie płyt o niedostatecznej sztywności tarczowej.



Rys. 5. Schematy zachowania się elementów konstrukcji w płaszczyźnie połaci dachu bez stężeń (a) i ze stężeniami (b i c)

Podstawowym zadaniem stężeń połaciowych poprzecznych jest zapewnienie geometrycznej niezmienności w płaszczyźnie połaci dachu układowi konstrukcyjnemu złożonemu z dźwigarów dachowych i pławi (rys. 5b i c). Pręty wykratowania stężeń połączone z pasami rygli (pełnościennych lub kratowych) oraz płatwami tworzą geometrycznie niezmienną kratownicę poziomą. Takie kratownice poziome (w polach skrajnych na rys. 5b) są dostatecznie sztywnymi elementami, zdolnymi przenieść obciążenia poziome od wiatru i hamowania suwnic itp. Ich przemieszczenia poziome są nieduże. Również nieduże będą przemieszczenia poziome kolejnych rygli w osi 3 i 4 na rys 5b, połączonych (przegubowo) płatwami z tarczą prętową jaką jest stężenie

połaciowe poprzeczne (w polach skrajnych). Projektując stężenia połaciowe poprzeczne można wykorzystywać konstrukcyjną rolę płatwi jako słupków poziomej kratownicy połaciowej. Niekiedy jednak stężenia połaciowe poprzeczne projektuje się jako konstrukcję niezależną (nie połączoną z płatwiami).

Zastosowanie stężeń połaciowych poprzecznych sprawia, iż spełniają one dodatkowe funkcje konstrukcyjne w szkielecie nośnym hali.

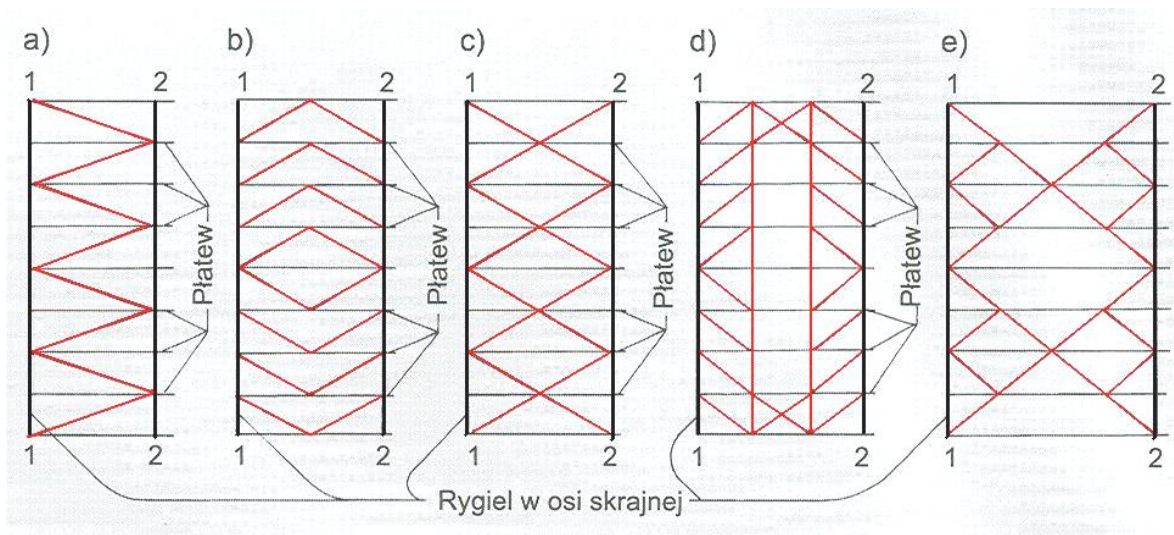
Poziome stężenie połaciowe poprzeczne dachu hali stanowi podporę górną dla słupów ściany szczytowej. Brak takiej podpory i ewentualnie przyjęcie wspornikowego schematu słupów ściany szczytowej prowadziłyby do konieczności stosowania materiałochłonnych (ciężkich) rozwiązań konstrukcyjnych ściany szczytowej.

Poprzeczne stężenia połaciowe odgrywają istotną rolę zapewnienia stateczności rygla dachowego z płaszczyzny układu poprzecznego hali. Skracają one bowiem długości wyboczeniowe ściskanych prętów pasów rygli kratowych i zwichrzenia zginanych rygli pełnościennych.

W dachu z płatwiami pokazanym na rys. 5b, ograniczają one długości wyboczeniowe ściskanych pasów w płaszczyźnie połąci dachowej (prostopadłej do wiązara) do rozstawu między płatwiami $l_{w1} = a$. W sytuacji braku stężeń połaciowych (rys. 5a) ta długość wyboczeniowa byłaby równa rozpiętości wiązara kratowego $l_{w2} = l$. Stosując stężenie pokazane na rys. 5c długość wyboczeniowa pasów z płaszczyzny dźwigara jest równa odległości nieprzesuwnego przytrzymania $l_{w3} = b$.

Poprzeczne stężenia połaciowe dachów hal odgrywają bardzo ważną rolę konstrukcyjną i są niezbędnym elementem ustroju nośnego. Stosuje się je na całej szerokości dachu, najczęściej między dwoma sąsiednimi dźwigarami, przy czym umieszcza się je w skrajnych lub przedskrajnych polach każdej części hali oddzielonej przerwą dylatacyjną, w tych polach, w których występują stężenia pionowe ścian podłużnych. Stężenia połaciowe poprzeczne oraz pionowe ścian podłużnych łącząc dwa układy poprzeczne tworzą bikonstrukcję, tj. przestrzenny, geometrycznie niezmienny ustrój, do którego „dołączone” kolejne układy poprzeczne tworzą stateczny szkielet nośny hali.

Przykłady schematów geometrycznych skratowań tężników połaciowych poprzecznych dachu hali pokazano na rys. 6. Układ geometryczny prętowych stężeń połaciowych poprzecznych zależy od wielkości obciążeń, rozstawu układów poprzecznych i rozstawu płatwi. Przy niedużym rozstawie układów poprzecznych można stosować skratowanie pokazane na rys. 6a, b.

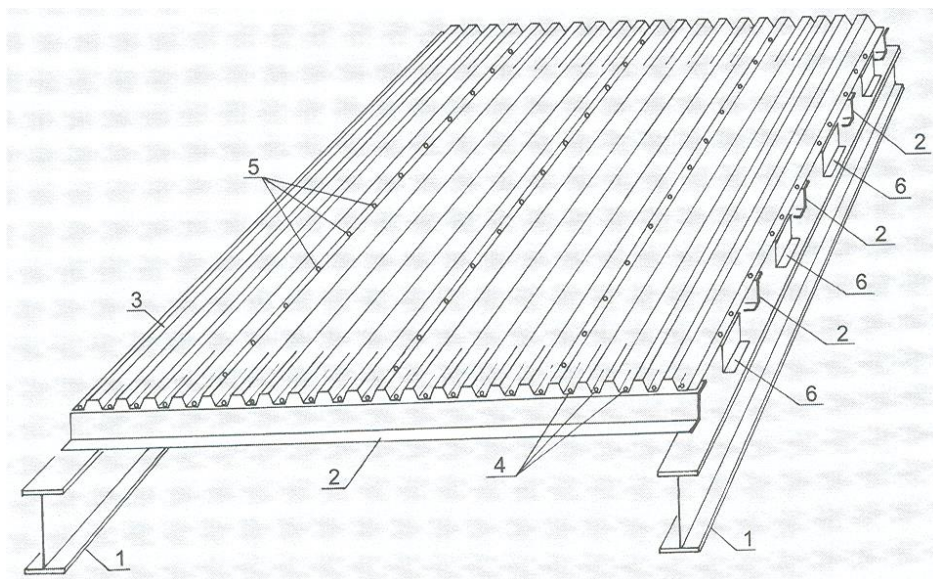


Rys. 6. Przykłady schematów geometrycznych skratowań tężników połączeniowych poprzecznych dachu hali

Przy dużym rozstawie rygli układów poprzecznych i przy wysokich halach, w których obciążenie wiatrem jest duże projektuje się stężenia o skratowaniach pokazanych np. na rys. 6c, d i e. Unika się w ten sposób przy dużym stosunku rozstawu rygli do odstępów płatwi, zbyt ostrych kątów nachylenia prętów wykratowań stężeń. Stężenia typu X (rys. 6c) projektuje się przy założeniu, że pod wpływem nawet małych sił ściskających, pręty ulegają wyboczeniu sprężystemu i całe obciążenie poprzeczne tężnika przenoszą pręty rozciągane (rys. 261). Przy takim traktowaniu stężenia krzyżowego (typu X), zużycie materiału jest mniejsze niż dla tężnika, którego pręty przenoszą wyężenia ściskające.

Jako tężniki połączeniowe poprzeczne dachu hali można wykorzystać blachy fałdowe stanowiące osłony dachowe. Blachy fałdowe wraz z płatwiami i ryglami oraz innymi uzupełniającymi elementami tworzą tarcze zdolne przenosić obciążenia poziome w płaszczyźnie połaci dachu. Schemat konstrukcji tarczy usztywniającej z blach fałdowych, pokazano na rys. 7, model obliczeniowy zaś na rys. 27.

Współpracę między arkuszami blachy fałdowej lub między nimi i elementami prętowymi zapewniają łączniki o odpowiedniej nośności. Do określenia sił wewnętrznych w takich stężeniach stosuje się uproszczone modele obliczeniowe np. kratownice lub wysokie belki o średniku fałdowym.

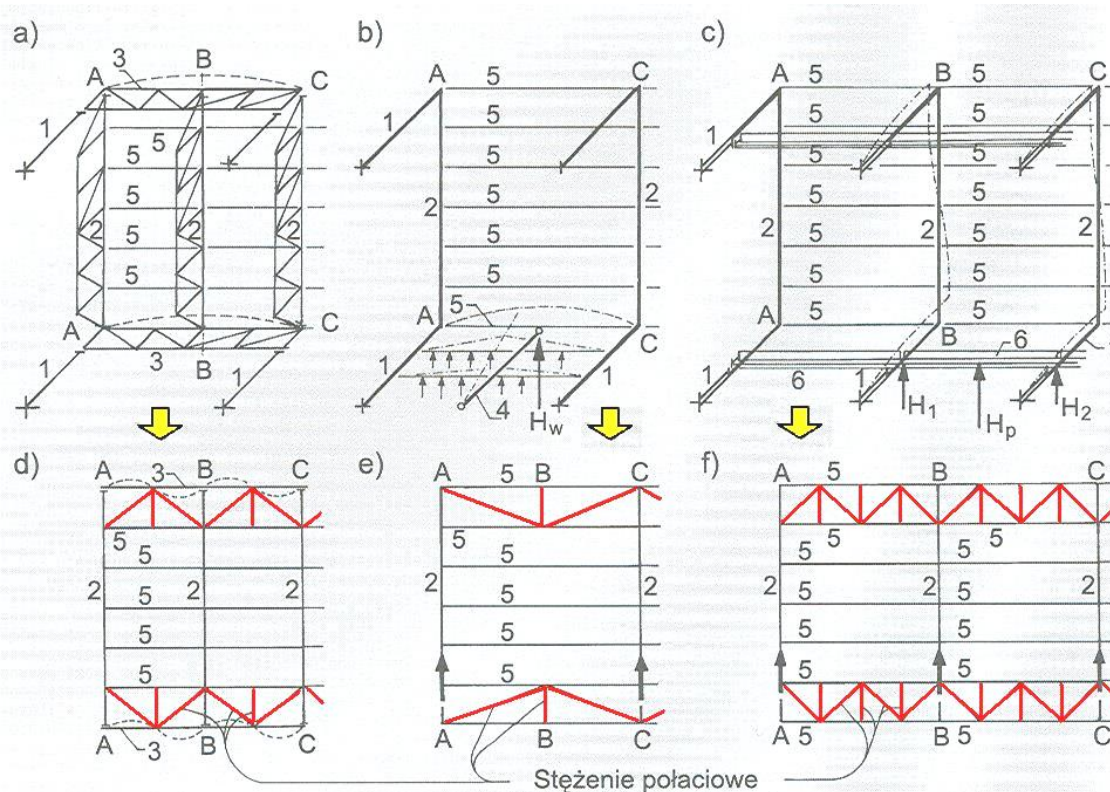


Rys. 7. Schemat konstrukcji tarczy usztywniającej z blach fałdowych: 1 – rygiel dachowy, 2 – płatew, 3 – blacha fałdowa, 4 – łączniki główne blachy fałdowej, 5 – łączniki uszczelniające, 6 – elementy pośrednie

1.2.3. Stężenia połaciowe podłużne dachów hal

Poziome, połaciowe stężenia podłużne dachów hal nie zawsze muszą być stosowane. Są one niezbędne, gdy zachodzi konieczność przeniesienia sił prostopadłych do ścian podłużnych i skonstruowania podpór pośrednich dla słupów pośrednich ściany zewnętrznej (konstrukcji wsporczej obudowy ściany). Umieszcza się je przy okapie dachu. Pręty skratowań tych stężeń wraz z dwiema przyokapowymi płatkami tworzą poziomą kratownicę podłużną w dachu hali. Kratownice te łącząc się z tężniakiem połaciowym poprzecznym, kształtują tarczę (zamkniętą ramę) zapewniającą dobre przenoszenie obciążeń poziomych, a także umożliwiają traktowanie szkieletu jako układu przestrzennego.

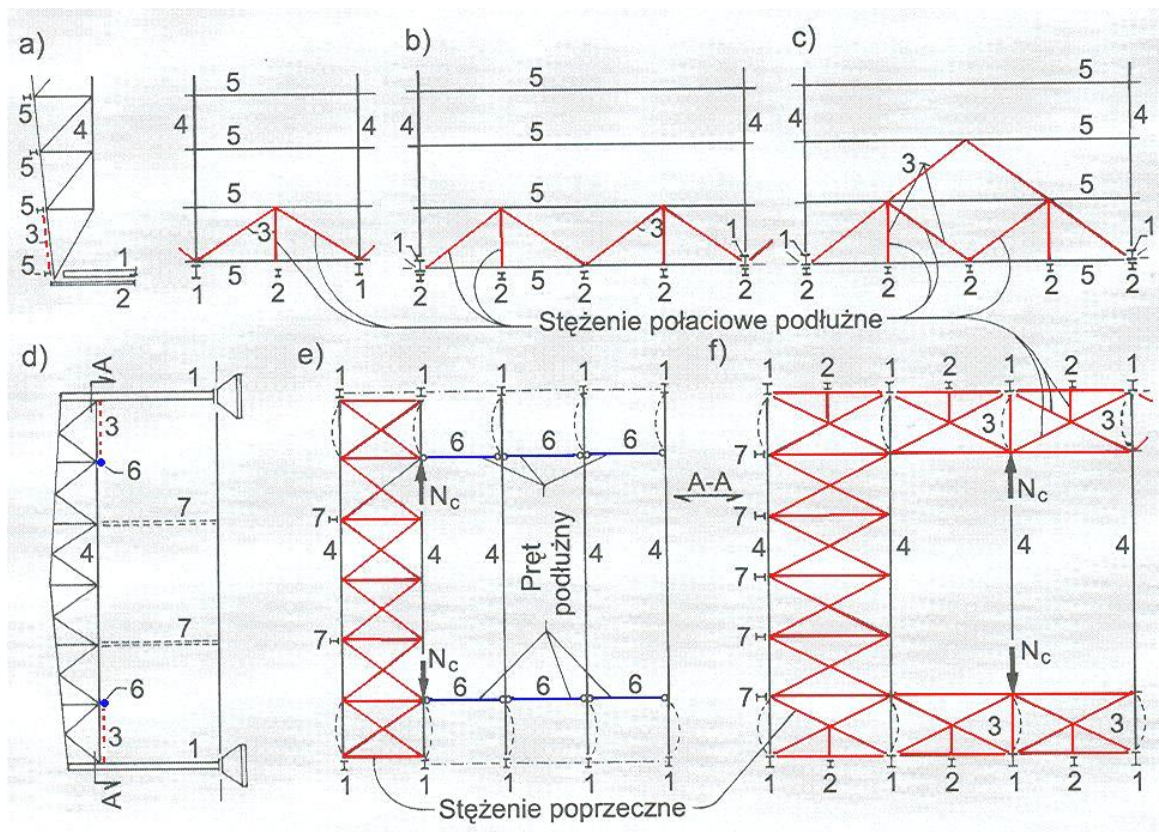
Przestrzenne wytężenie szkieletu nośnego hali może być wykorzystane, gdy występują duże siły poziome lub pionowe (działające na mimośrodkach) od suwnic pomostowych. Wówczas stężenia połaciowe podłużne pełnią rolę elementów rozkładających obciążenie na kilka układów poprzecznych. W przypadku ich braku, co pokazano na rys. 8c, na przykład siła pozioma H_p od hamowania suwnicy przekazuje się przez belkę podsuwnicową na najbliższe słupy w postaci reakcji H_1 i H_2 . W sytuacji pokazanej na rys. 8f, gdy występują stężenia połaciowe podłużne, oddziaływania poziome od suwnicy przekazują się również na sąsiednie układy poprzeczne.



Rys. 8. Schematy wyężenia i ilustracja roli konstrukcyjnej stężeń połaciowych podłużnych: 1 – słuł główny, 2 – rygiel dachowy, 3 – podciąg, 4 – słuł pośredni, 5 – łatew

Stężenia połaciowe podłużne dachów hal projektuje się, gdy rozstaw słuł głównych jest większy od rozstawu rygli dachowych (w ustrojach nośnych z podciągami - rys. 8a) lub gdy stosuje się słuł pośrednie konstrukcji wsporczej obudowy ścian (rys. 8b). W pierwszym przypadku stężenia te zmniejszają długości wyboczeniowe pasa górnego podciągu między słułami głównymi (por. długości wyboczeniowe konstrukcji bez tężnika – rys. 8a i z tężnikiem – rys. 8d). W drugiej sytuacji zadaniem konstrukcyjnym stężeń połaciowych podłużnych jest stworzenie podparcia dla wahlwych słuł konstrukcji wsporczej obudowy ściany podłużnej, co pokazano na rys. 8b i e. Wówczas słuł pośredni, przejmujący obciążenie poziome od wiatru (działającego na ściany boczne), przekazuje je za pośrednictwem połaciowego stężenia podłużnego na słuł główne układu poprzecznego (rys. 8b).

Kształty geometryczne wykratowań stężeń poziomych podłużnych dachów hal pokazano na rys. 9a, b, c, e, f. Mogą być usytuowane w płaszczyźnie łaci (pasów górnych rygli dachowych), co pokazano na rys. 9a, b i c lub w poziome pasa dolnego rygla układu poprzecznego – patrz rys. 9d, e i f.



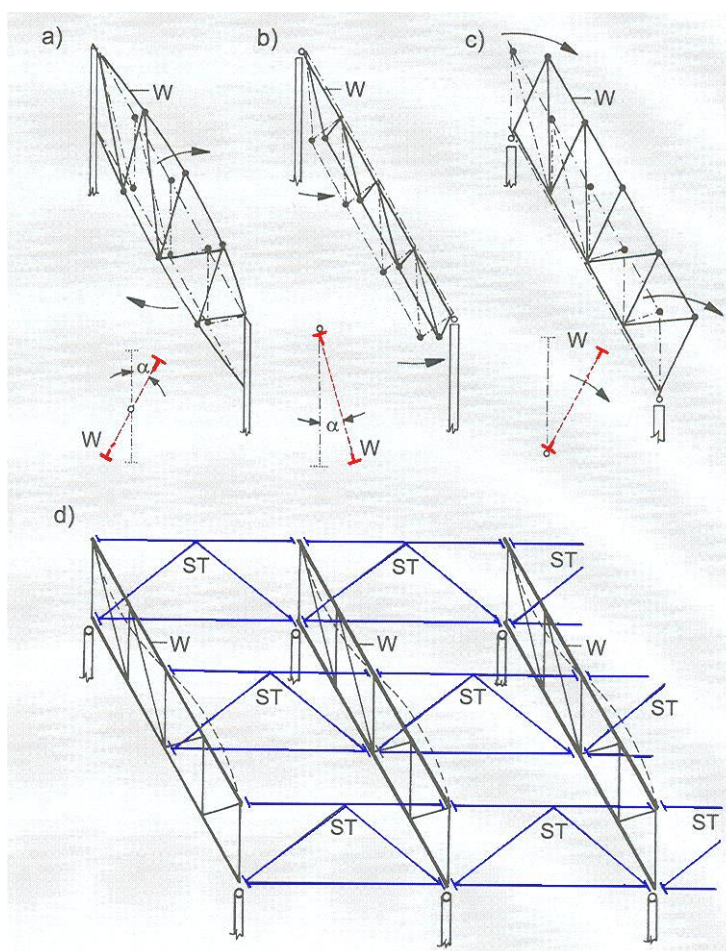
Rys. 9. Schematy geometryczne wykratowań stężeń poziomych podłużnych dachów kratowych hal: 1 – słup główny, 2 – słup pośredni, 3 – stężeńie połaciowe podłużne, 4 – rygiel dachowy, 5 – płatew, 6 – pręt podłużny, 7 – słup ściany czołowej

W układach poprzecznych o sztywnych połączeniach słupów z ryglami kratowymi, w strefie przypodporowej ich pasy dolne są ściskane. Przy braku stężeń międzywiązarowych i poziomych w płaszczyźnie pasów dolnych wiązarów, długość wyboczeniowa pasów dolnych z płaszczyzny ustroju jest równa rozpiętości kratownicy. Wówczas umieszczenie stężeńia poziomego podłużnego i odpowiedniego stężeńia poprzecznego w płaszczyźnie pasa dolnego rygla zabezpiecza go przed utratą stateczności ogólnej (skraca jego długość wyboczeniową z płaszczyzny kratownicy (patrz rys. 9d÷f).

W przypadku braku słupów pośrednich w ścianie podłużnej w celu skrócenia długości wyboczeniowej ściskanych pasów dolnych kratowego rygla dachowego, można zastosować pręty podłużne połączone z stężeńiem poprzecznym w polu skrajnym – w sposób pokazany rys. 9e.

1.2.4. Stężenia pionowe podłużne kratowych dachów hal

Pionowe stężenia podłużne dachów hal stosuje się przede wszystkim w sytuacji, gdy rygiel układu poprzecznego jest kratownicą. Takie kratowe dźwigary dachowe mają bardzo małą sztywność giętą ze swojej płaszczyzny oraz skrętną, a ponadto w przypadku przegubowego połączenia ze słupami są podatne na obrót wzdłuż osi podłużnej. Głównym zadaniem konstrukcyjnym poziomych stężeń podłużnych jest zabezpieczyć dźwigary kratowe od skręcenia się (rys. 10a), pochylenia (rys. 10b) lub wywrócenia (rys. 10c) zarówno w trakcie montażu, jak i podczas eksploatacji obiektu.



Rys. 10. Analiza sztywności podłużnej dachów kratowych: W – wiązar, ST – stężenie

Stężenia pionowe dachów kratowych stosuje się jako skratowania ST (rys. 10d) między sąsiednimi wiązarami. Stąd też nazywa się je również stężeniami międzywiązarowymi. Ich rola jest stabilizująco-usztywniająca przestrzenny układ kratowy dachu

hali w kierunku podłużnym. Tężniki pionowe służą przede wszystkim do zapewnienia prawidłowego, wzajemnego ustawienia wiązarów podczas montażu (uniemożliwiający skręcenie, przechylenie i wywrócenie). Zadaniem pionowych tężników dachowych może być również zabezpieczenie drgań i poziomych przemieszczeń pasów dolnych wiązarów podczas pracy suwnic i wciągników. Spełniają one również rolę usztywnień zapewniających potrzebną długość wyboczeniową ściskanych części rygla dachowego co pokazano na rys. 10d. Zaleca się je również stosować w miejscu załamania pasów kratownic, dla zrównoważenia losowych wytyżeń prostopadłych do płaszczyzny dźwigara.

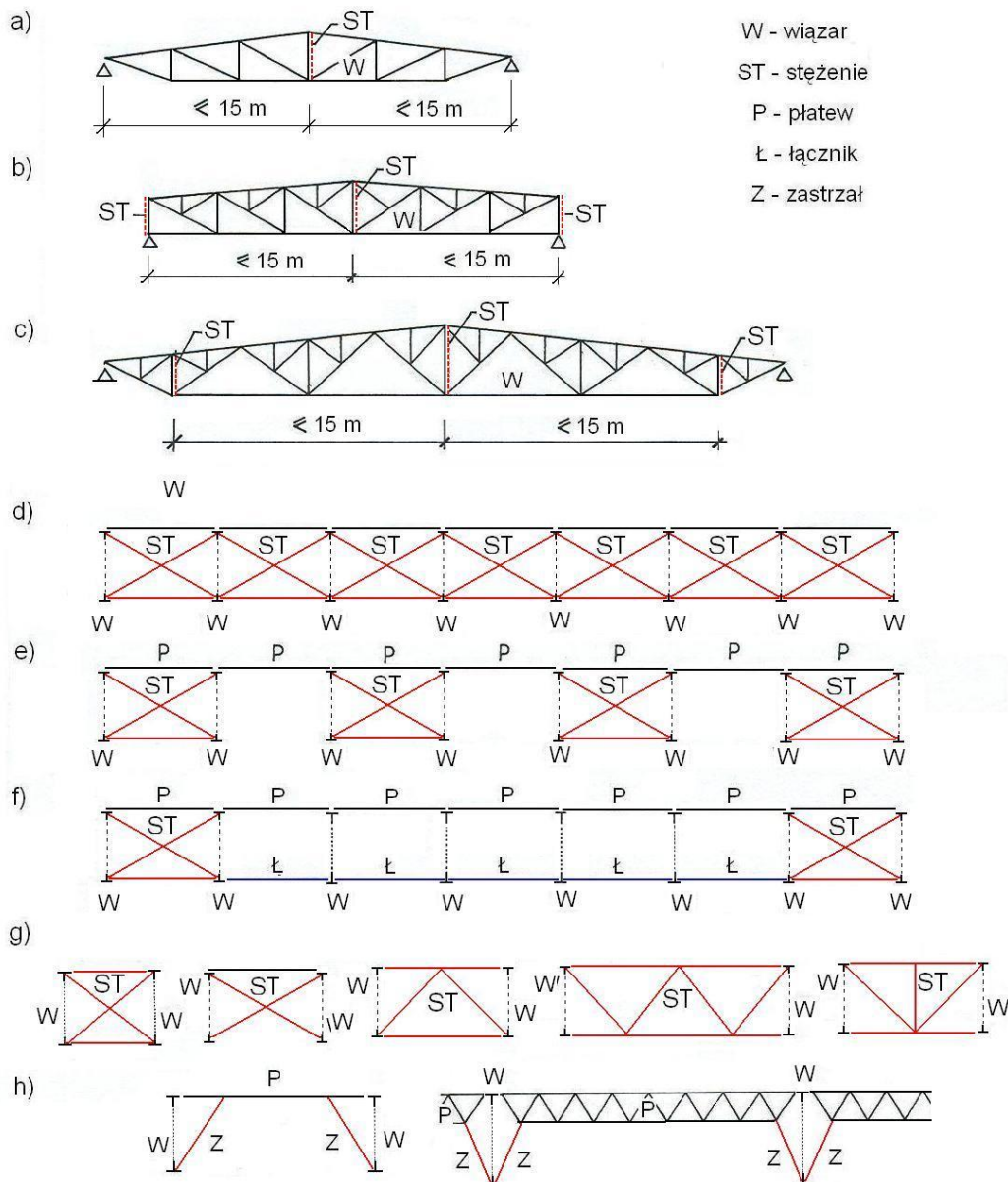
Stężenia międzywiązarowe należy rozmieszczać w środku rozpiętości dźwigara lub gęściej, a w odniesieniu do dźwigarów ze słupkami podporowymi również w linii podpór. Odstęp tych stężeń nie powinien być większy niż 15 m (rys. 11a, b i c). Kratowe dźwigary dachowe powinny być połączone stężeniami pionowymi podłużnymi co najmniej w polach, w których występują poprzeczne stężenia połączeniowe. Znaczy to, iż w uzasadnionych przypadkach stosuje się je również na całej długości dachu hali. Na przykład w halach z suwnicami o udźwigu większym niż 15 Mg należy stosować stężenia pionowe na całej długości dachu obiektu.

Pionowe stężenia podłużne kratowych dachów umieszcza się: co najmniej tam, gdzie występują stężenia połączeniowe poprzeczne (rys. 11f), na całej jej długości (rys. 11d) lub w wybranych polach (rys. 11e). Rozmieszczenie stężeń jak na rys. 11e stosuje się m. in. jeśli konstrukcja dachowa jest montowana w sposób blokowy. Każdy blok jest złożony z dwóch wiązarów i płatwi wraz ze stężeniami połączeniowymi, a niekiedy i z pokryciem dachowym, jest ponadto zaopatrzone w pionowe stężenia podłużne. Po ustawieniu takiego zespołu konstrukcyjnego stężenia pionowe podłużne nie są najczęściej rozbierane.

Obciążenie od wiatru działające równoległe do kalenicy sprawia, że niezbędne jest zastosowanie niezależnych stężeń pionowych podłużnych również dla dachowych świetlików podłużnych (patrz rys. 14). W celu prostego przekazania obciążeń z konstrukcji hali na fundament, zaleca się stosowanie stężeń podłużnych świetlików i słupów w tym samym polu, gdzie znajduje się stężenie połączeniowe poprzeczne.

Układy geometryczne prętów pionowych stężeń podłużnych hal pokazano na rys. 11g i h. Często jako pasy górne tych tężników wykorzystuje się pręty płatwi pełnościennych. Przy małym rozstawie wiązarów w stosunku do ich wysokości stosuje się rozwiązania podane na rys. 11g. Chcąc uniknąć ostrych kątów wykratowań prę-

tów tężników, jako usztywnienia podłużne dachów stosuje się kratownice stężące. Płatwie kratowe (stosuje się je dla rozpiętości większych niż 10 m) są często wykorzystywane jako część pionowego stężenia podłużnego dachu hali (rys. 11g). Wówczas przypodporowe węzły dolne płatwi kratowych, są połączone prętem-zastrzałem z dolnym pasem rygla kratowego. Tworzy się wtedy rama kratowa, zwłaszcza gdy tężnik pionowy jest ciągły na całej długości budynku.

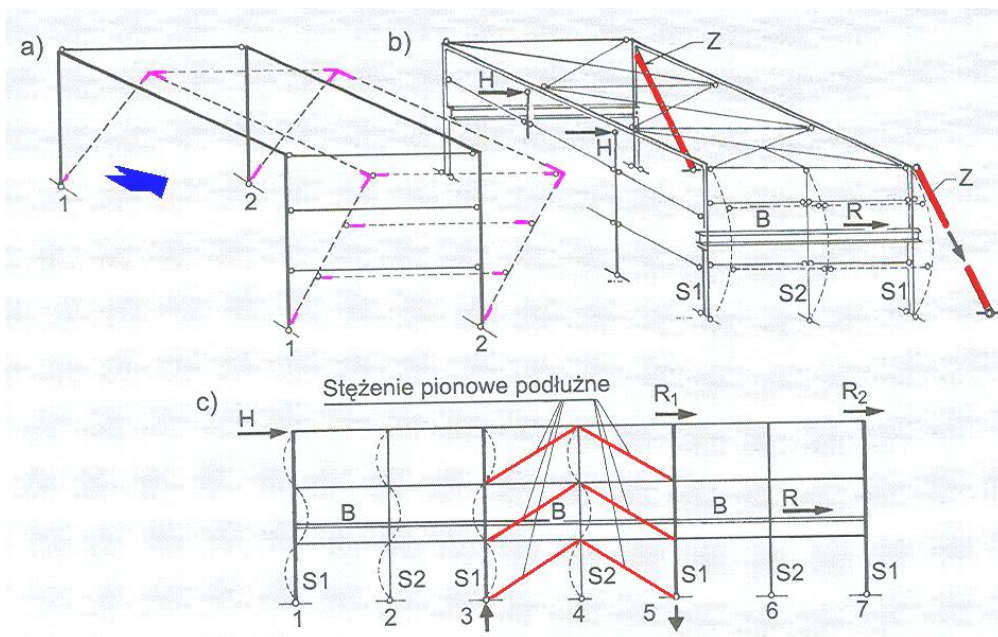


Rys. 11. Zasady rozmieszczanie i przykłady konstrukcji pionowych stężeń międzywiązarowych dachów kratownicowych: W – dźwigar kratowy, ST – stężenie międzywiązarowe, P – płatew, Z – zastrzał, Ł – łącznik

1.2.5. Pionowe stężenia podłużne słupów hal

Pionowe stężenia podłużne hal umieszcza się w linii słupów głównych, w kierunku podłużnej osi hali. Zapewniają one przede wszystkim stateczność płaskich poprzecznych układów głównych wzdłuż osi podłużnej budynku, gdyż słupy w tym kierunku traktuje się zwykle jako przegubowo połączone z fundamentami. W tym też sensie omawiane stężenia zapewniają stateczność podłużną i ogólną szkieletu nośnego hali, zarówno w trakcie montażu, jak i jej użytkowania.

Rolę konstrukcyjną pionowych stężeń podłużnych słupów ilustruje rys. 12a i b.



Rys. 12. Schematy możliwych deformacji i ilustracja roli konstrukcyjnej pionowych stężeń podłużnych słupów głównych hal: S1 – słup główny, S2 – słup pośredni, B – belka podsuwnicowa

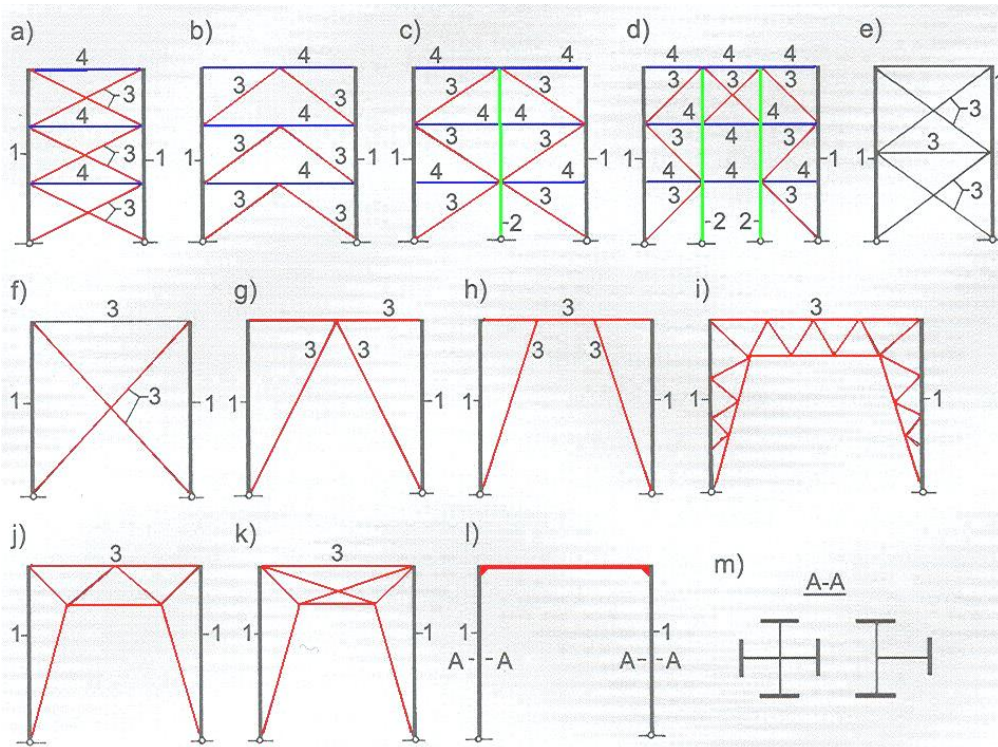
Zastosowanie prętów Z (rys. 12b), które pełnią rolę stężeń, sprawia, że geometrycznie zmienny układ konstrukcyjny pokazany na rys. 12a jest stateczny. Zadaniem pionowych stężeń podłużnych słupów jest ponadto przeniesienie sił poziomych od wiatru H działających na ściany szczytowe oraz sił od hamowania suwnic natorowych R (lub podwieszonych) i przekazanie ich na fundamenty, a także usztywnienie słupów głównych w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny poprzecznych układów nośnych. Tę rolę konstrukcyjną stężeń pokazano na rys. 12b i c. Słupy główne pro-

jektowane są w założeniu ich wytyczenia w płaszczyźnie układów poprzecznych hali. W płaszczyźnie ścian podłużnych są one o zdecydowanie mniejszej sztywności. W tym też kierunku mogą się wyboczyć, gdyż przyjmuje się ich przegubowe połączenia z fundamentem oraz ryglami pośrednimi i okapowym (rys. 12b). Zastosowanie niektórych rodzajów pionowych stężeń podłużnych słupów zmniejszające ich długości wyboczeniowe zapobiega niestateczności tych elementów. Dotyczy to zarówno słupów głównych, jak i słupów pośrednich. W sytuacji pokazanej na rys. 12b długość wyboczeniowa w płaszczyźnie ściany bocznej zarówno słupów głównych i pośrednich jest równa ich wysokości, w przypadku zaś zastosowania stężeń jak na rys. 12c długość ta skraca się trzykrotnie (warunkiem przyjęcia takiego modelu obliczeniowego wytyczenia słupów jest dostateczna nośność rygli ściennych na wyboczenie).

Stężenia podłużne słupów są usytuowane nie tylko w osi ścian zewnętrznych, ale również linii słupów wewnętrznych hal wielonawowych (w każdym rzędzie słupów głównych). Umieszcza się je w tych samych polach co połaciowe stężenia poprzeczne dachu hali. Należy je stosować co najmniej w skrajnych lub przedskrajnych polach siatki słupów (przy ścianach szczytowych lub dylatacjach). Są one elementem ustroju nośnego, niezbędnym zarówno w trakcie realizacji, jak i eksploatacji obiektu. W ten sposób uzyskuje się przestrzenny usztywniony szkielet hali nazywany bikonstrukcją.

W halach z suwnicowym transportem podpartym i świetlikami kalenicowymi należy stosować oddzielnie stężenia pionowe podłużne części podsuwnicowej i nadsuwnicowej słupów oraz świetlika. Jeśli w halach są suwnice natorowe na dwóch poziomach, to tężniki pionowe międzysłupowe w kierunku podłużnej osi budynku umieszcza się ponadto pomiędzy belkami podsuwnicowymi. Często belkę podsuwnicową wykorzystuje się jako element stężenia części dolnej słupów i ściany podłużnej. Wówczas stężenie pionowe podłużne górnej części nadsuwnicowej słupa nie leży w tej samej płaszczyźnie co stężenie części podsuwnicowej.

Schematy pionowych stężeń podłużnych słupów hal pokazano na rys. 13. Konstruuje się je jako kratowe (rys. 13a÷f), ramowo-kratowe (rys. 13g÷k), rzadziej zaś ramowe (rys. 13l). Stężenia kratowe umieszcza się zwykle między pasami słupów. Elementami tych kratownic są pasy sąsiednich słupów, krzyżulce, a niekiedy również jako słupki rygle ścienne (rys. 13a÷d). W konstrukcji usztywnień podłużnych hali pokazanych na rys. 13a i b wykorzystuje się rygle ścienne, na rys. 13c i d słupy pośrednie i rygle jako elementy nośne stężeń. Są one stosowane w halach bez suwnic lub z suwnicami o małym udźwigu.



Rys. 13. Schematy pionowych stężeń podłużnych słupów hal: 1 – słup główny, 2 – słup pośredni, 3 – element stężenia międzysłupowego, 4 – rygiel ścienny

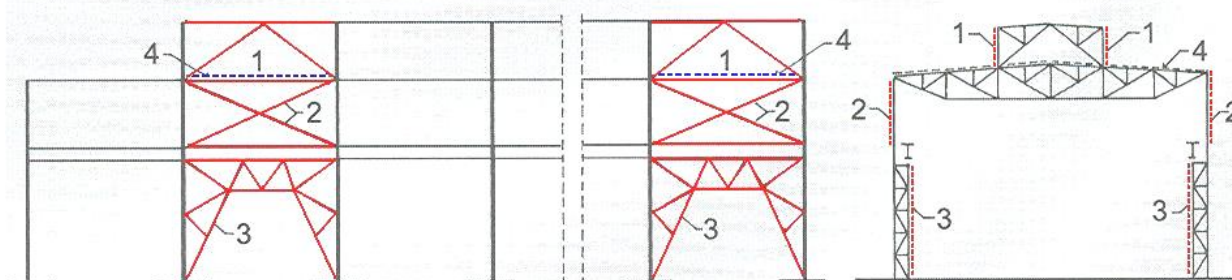
W halach wysokich, a także z suwnicami o dużych udźwigach stosuje się stężenia portalowe (rys. 13h÷k). Mają one również zastosowanie w sytuacjach występowania bram w ścianach podłużnych lub ciągów komunikacyjnych między ramami w kierunku poprzecznym w halach wielonawowych. Stwarza się wówczas możliwość swobodnego wykorzystania przestrzeni między słupami. Stężenia pionowe podłużne słupów hal pokazane na rys. 13e÷k, są niezależnymi konstrukcjami usztywniającymi budynek. W sytuacji zastosowania tężników ramowych (rys. 13l) słupy główne, stanowiące jednocześnie ich elementy nośne, mają odpowiednio ukształtowany przekrój poprzeczny (rys. 13m).

Stężenia typu X (rys. 13a, e, f) wykonuje się z wiotkich prętów, w założeniu iż będą one tylko rozciąganyimi elementami stężenia (w przypadku obciążeń ściskających ulegną one sprężystemu wyboczeniu). Schemat portalowego stężenia z prętami uwzględnianymi w analizie jako wyłącznie rozciągane pokazano na rys. 33.

W halach z podłużnymi świetlikami i suwnicami natorowymi, stosuje się niezależne stężenia tych elementów. Obciążenia od wiatru działające równoległe do kalenicy sprawia, że niezbędne jest zastosowanie stężeń świetlików w kierunku po-

dłużnym hali. W przypadku hal z transportem podpartym, obciążenie suwnic natorowych od hamowania mostu (równoległe do toru jezdny) H_r , jest przekazywane po przez belkę podsownicową na słupy. To obciążenie jest skierowane prostopadłe do płaszczyzny układów poprzecznych i musi być przejęte przez stężenie podłużne w linii słupów hali. W takich sytuacjach projektowych często stosuje się w linii słupów górne stężenie podłużne, przejmujące obciążenie z dachu i dolne stężenie które oprócz oddziaływań stężenia dolnego obciążenia od hamowania suwnicy. Wówczas stężenia dolne daje się w osi belki podsownicowej.

Na rys. 14 pokazano przykład rozmieszczenia stężeń w hali ze świetlikami podłużnymi i suwnicą natorową. W celu prostego przekazania obciążenia z konstrukcji hali na fundament, zaleca się stosowanie stężeń podłużnych, świetlików (1), słupów w części nadsownicowej (2) i podsownicowej (3) w tym samym polu, gdzie znajdują się stężenia połączeniowe poprzeczne (4).

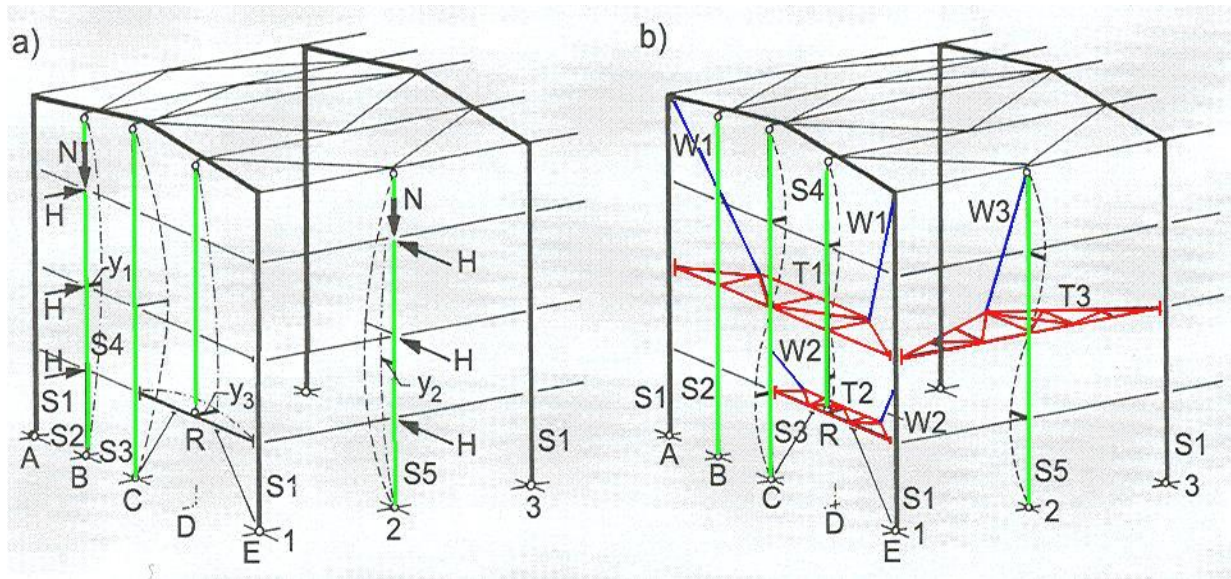


Rys. 14. Rozmieszczenie stężeń pionowych podłużnych w hali ze świetlikami podłużnymi i suwnicą natorową: 1 – świetlik, 2 – stężenie słupów w części nadsownicowej, 3 – stężenie słupów w części podsownicowej, 4 – stężenie połączeniowe poprzeczne

1.2.6. Stężenia poziome ścian szczytowych i podłużnych

W halach o dużych wysokościach stosuje się dodatkowe stężenia poziome ścian szczytowych i podłużnych T1, T2, T3 (rys. 15b). Ich zadaniem konstrukcyjnym jest stworzenie dodatkowych podpór pośrednich (poza fundamentem i połączeniem dachu), dla wysokich słupów pośrednich ścian bocznych i szczytowych (rys. 15a). To dodatkowe podparcie powoduje zmniejszenie wyężenia słupów obudowy w stosunku do

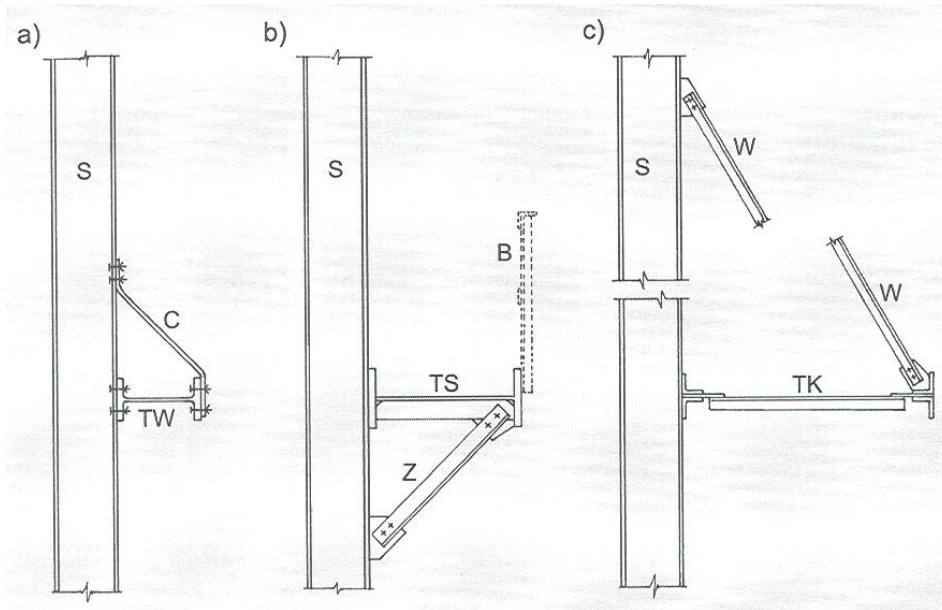
sytuacji, gdy są one tylko połączone z fundamentem i podparte na konstrukcji dachu (por. rys. 15a i 15b). Oprócz dodatkowego podparcia tych elementów zmniejszają one długości wybozeniowe zarówno słupów pośrednich w płaszczyźnie prostopadłej do ściany, jak również słupów głównych układów poprzecznych w płaszczyźnie ścian podłużnych hali. Przy braku tych stężeń (rys. 15a) długość wybozeniowa słupów pośrednich jest równa ich wysokości, w sytuacji zaś pokazanej na rys. 15b długość wybozeniowa jest dwukrotnie mniejsza.



Rys. 15. Schematy wytyczenia i ilustracja roli konstrukcyjnej stężeń poziomych ścian szczytowych i podłużnych: S1 – słup główny, S2÷S5 – słupy pośrednie, T1÷T3 – poziome stężenia wiatrowe ścian, W1÷W3 – wieszaki

Konstrukcje poziomych tężników ścian szczytowych i podłużnych pokazano na rys. 16.

Tężniki poziome ścian (rys. 16) projektuje się jako pełnościennie o przekrojach z dwuteowników walcowanych TW, spawanych TS, a przede wszystkim jako ustroje kratowe TK. Przegubowymi podporami tych tężników są słupy główne układu poprzecznego hali S. Z uwagi na małą sztywność tężników wiatrowych względem osi poziomej oraz przegubowe połączenia ze słupami pośrednimi (dla zapobieżenia ich skręcaniu się) należy ich pasy wewnętrzne usztywnić prętami: wieszakami W lub zastrzałami Z (rys. 16).



Rys. 16. Rozwiązania konstrukcyjne poziomych stężeń ścian: S – słup, TW – tężnik z dwuteownika walcowanego, TS – tężnik o blachownicowym przekroju dwuteowym, TK – tężnik kratowy, C – cięgno, Z – zastrzał, W – wieszak

2. WYZNACZANIE SIŁ WEWNĘTRZNYCH W STĘŻENIACH

2.1. Wprowadzenie

Analizując zarówno zasady kształtowania szkieletów nośnych, jak i modeli obliczeniowych głównych układów poprzecznych hal, wskazano na bardzo ważną rolę stężeń dachów i słupów. Zasadnicze ich zadania konstrukcyjne to:

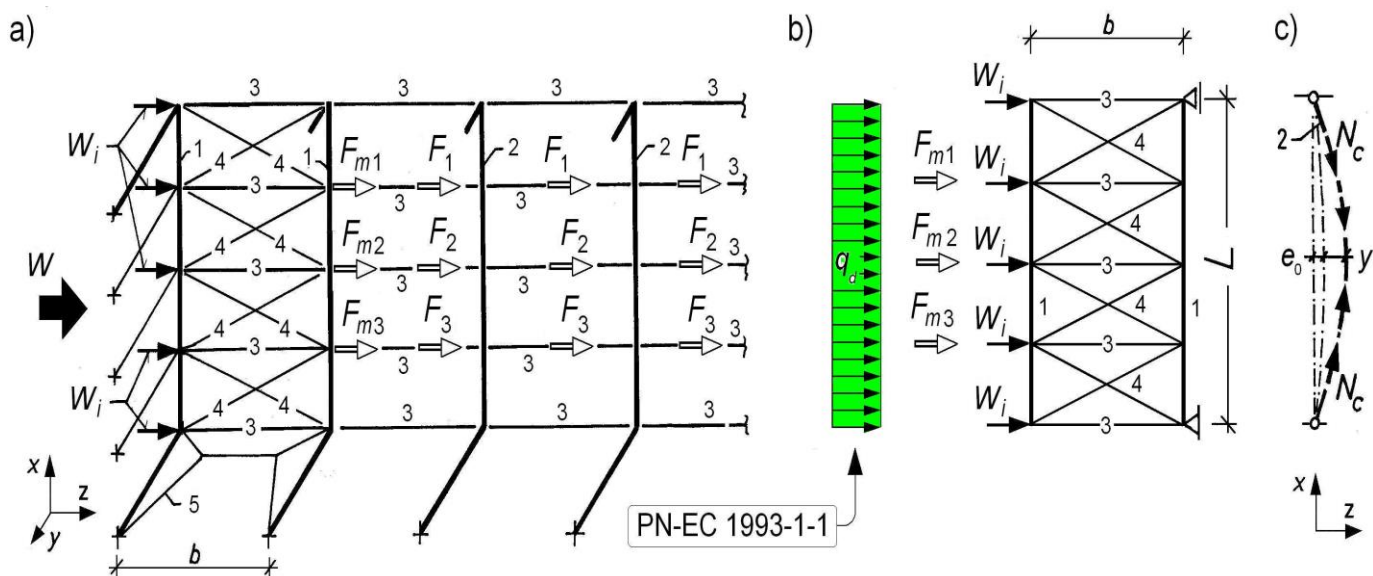
- zapewnienie geometrycznej niezmienności układu i stateczności jego położenia,
- redukcja długości wyboczeniowych elementów ściskanych lub i zginanych,
- przeniesienie obciążeń poziomych od wiatru i urządzeń transportowych w kierunku prostopadłym do płaszczyzny głównych nośnych układów poprzecznych hal i ścian podłużnych hali, a także
- przeniesienie sił od imperfekcji geometrycznych rygli dachowych oraz słupów.

Stężenia wraz z płaskimi układami poprzecznymi tworzą przestrzenną konstrukcję nośną hali, w której elementy składowe współpracują ze sobą w przenoszeniu obciążeń ustroju.

Najczęściej w analizie statycznej stężenia są rozpatrywane jako płaskie ustroje „wydzielone” z przestrzennej konstrukcji nośnej obiektu. Istotną sprawą dla bezpiecznej oceny wyłączenia stężeń jest poprawna identyfikacja ich zastępczego schematu statycznego oraz określenie obciążeń, które powinny one przenosić. Należy je sprawdzać na zachowanie stateczności i nośności, która musi być zapewniona w czasie eksploatacji, transportu, budowy, przebudowy i remontu. Oprócz tych obciążeń należy w ocenie wyłączenia prętów stężeń uwzględnić oddziaływania prętów ścisanych, których położenie jest stabilizowane przez stężenia, a także wpływ imperfekcji geometrycznych ustroju nośnego.

2.2. Obliczenia statyczne stężeń połączeniowych poprzecznych

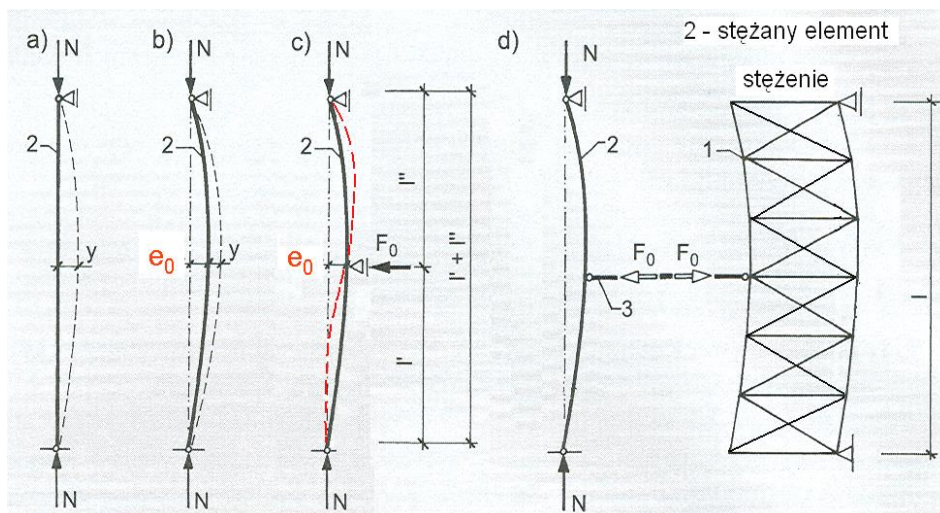
Prętowe stężenie połączeniowe poprzeczne dachu hali jest kratownicą umieszczoną między pasami górnymi dwóch sąsiednich rygli dachowych (rys.17). Pasami tej poziomej kratownicy są pasy górne dachowych rygli kratowych lub pełnościennych, rolę jej słupków spełniają płatwie, krzyżulców zaś skośne pręty stężenia. Konstrukcja połączeń tych elementów ze sobą pozwala założyć w modelu obliczeniowym przegubowe połączenia prętów analizowanego ustroju.



Rys. 17. Siły obciążające stężenie połączeniowe poprzeczne hali: 1 – rygiel dachowy w polu skrajnym, 2 – rygiel dachowy w polu pośrednim, 3 – płatwie, 4 – pręt stężenia połączeniowego poprzecznego, 5 – pionowe stężenie słupów

Jako schemat statyczny konstrukcji połaciowego stężenia poprzecznego przyjmuje się kratownicę (rys. 17b). Jest ona usytuowana w płaszczyźnie połaci dachu. Jej rozpiętość jest równa szerokości nawy hali (rys. 17a). Słupy i stężenia międzysłupowe hali są podporami analizowanego tężnika dachowego. Zasadnicze obciążenie zewnętrzne tej kratownicy to obciążenie poziome od wiatru W_i działające na ścianę szczytową (parcie lub ssanie), a także zastępcze siły imperfekcyjne F_{mi} , których źródłem są imperfekcje geometryczne w płaszczyźnie połaci dachu pasów górnych rygli dachowych. Obciążenie tężnika połaciowego poprzecznego wiatrem jest przekazywane przez słupy ściany szczytowej (rys. 17a).

Oprócz wytrzymałościowej roli w przyjmowaniu w/w obciążeń, połaciowe stężenie poprzeczne zapobiega niestateczności w płaszczyźnie połaci ściskanych lub zginanych rygli dachowych układów poprzecznych, usytuowanych w kolejnych osiach hali. W wyniku działania obciążeń pionowych (od ciężaru własnego, śniegu, wiatru) w ryglach dachowych powstają wyężenia ściskające (siły ściskające w pasach górnych kratownic lub naprężenie ściskające w pasach rygli pełnościennych). Te wyężenia ściskające mogą prowadzić do: wyboczenia pasów górnych wiązarów w płaszczyźnie połaci dachu lub zwichrzenia rygli pełnościennych. Wówczas dochodziłoby do wygięcia pasów górnych rygli dachowych, a zapobiega temu stabilizująca rola poprzecznego stężenia połaciowego, co pokazano na rys. 17 i 18.



Rys. 18. Model obliczeniowy pręta stabilizowanego przez stężenie i jego oddziaływanie: 1 – stężenie połaciowe poprzeczne, 2 – rygiel dachowy w polu pośrednim, 3 – płatek

Rozpatruje się (rys. 17) układ złożony z pasów górnych rygli dachowych 1 (w polu skrajnym) i 2 (w polach pośrednich), połączonych prętami płatwi 3 i skratowań stężenia 4. W polu skrajnym pręty 1, 3 i 4 tworzą połączenie poprzeczne. Pasy rygli 2 (w polach pośrednich) są podparte nieprzesuwnie w płaszczyźnie połączy dachu przez połączenie ich z prętami stabilizującymi 3 (płatwiami) z tężnikiem w polu skrajnym. W prętach stabilizujących (podpierających) 3 i ich połączeniach powstają siły F_0 . Występują one wskutek nieuniknionych imperfekcji geometrycznych Δ (wstępnych niedoskonałości wytwórczych i montażowych) osi stabilizowanych prętów 2 oraz stężonych 1. Gdyby pas górny rygla dachowego nie był podparty w płaszczyźnie połączy dachu, wygiąłby się swobodnie na pełnej długości (rys. 17c i 18a). Ściskane pasy górne rygli dachowych 1 oraz 2 mają zawsze wstępne wygięcia w płaszczyźnie połączy (rys. 18b) i utrzymanie wstępnie wygiętego pręta w stanie równowagi statycznej wymaga działania sił F_0 (rys. 18c). Istnienie nieprzesuwnych podparć bocznych wymusza wyboczenie między punktami połączeń prętów 3 z ryglami dachowymi 1 i 2. Jest to przyczyna powstania w prętach stabilizujących sił F_0 przekazywanych na tężnik (rys. 18d).

2.3. Obciążenie imperfekcyjne poziomych stężeń poprzecznych dźwigarów

2.3.1. Jednoprzęsłowe poprzeczne stężenia połączeniowe dźwigarów dachowych

W PN-EN 1993-1-1 podano zasady obliczeń poprzecznego stężenia o schemacie dźwigara jednoprzęsłowego (rys. 19c). Jego obciążenie statecznościowe wyznacza się jako oddziaływanie równomiernie rozłożone $q_{d,1}$, wywołane imperfekcjami geometrycznymi e_0 stężanych m elementów (rygli dachowych).

Stabilizowanym, ściskanym elementom dźwigarów przyporządkowuje się model prętów z wstępnymi wygięciami łukowymi o strzałce

$$e_0 = \alpha_m \frac{L}{500}, \quad (1)$$

gdzie:

α_m – współczynnik kumulacji oddziaływań stężanych m elementów,

W przypadku przyjęcia paraboli jako linii wstępnej imperfekcji łukowej o strzałce e_0 i stałej na długości L siły ściskającej N_{Ed} w stężonym elemencie (wykorzystując zależność między obciążeniem łuku i rozparem) imperfekcyjne równomiernie rozłożone (zastępcze) obciążenie stabilizujące $q_{d,1}$ (rys. 17b, 19c) wynosi

$$q_{d,1} = \sum_{i=1}^m 8N_{Ed} \frac{e_0 + \delta_q}{L^2}, \quad (3)$$

gdzie:

N_{Ed} – maksymalna siła ściskająca w stężonym elemencie,

δ_q – ugięcie stężenia od oddziaływania q_d i wszystkich obciążeń zewnętrznych, uzyskane z analizy I rzędu (w przypadku, gdy w analizie ustroju stosuje się teorię II rzędu, to można przyjąć $\delta_q = 0$).

Wzór (3) uwzględnia wpływ sztywności stężenia poprzecznego na jego wyężenie, gdyż strzałka wygięcia łukowego e_0 jest zwiększona o ugięcie tężnika δ_q . Można je pominąć w obliczeniach, gdy $\delta_q < L/2500$.

Z analizy (3) wynika, że obciążenie przekazywane przez wstępnie wygięty stabilizowany element w dużym stopniu zależy od sztywności stężenia (jest ono tym większe, im sztywność stężenia jest mniejsza).

Siłę ściskającą N_{Ed} w stężonym pasie dźwigara kratowego (rys. 19a, 20a), która jest zmienna na długości, przyjmuje się (po stronie bezpiecznej) z przedziału, w którym jest ona największa. Gdy stężenie stabilizuje ściskany pas zginanego dźwigara pełnościennego o stałej wysokości (rys. 1b), to siłę N_{Ed} można wyznaczyć ze wzoru

$$N_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{h}, \quad (4)$$

gdzie:

h – całkowita wysokość elementu (rys. 19b, 20b).

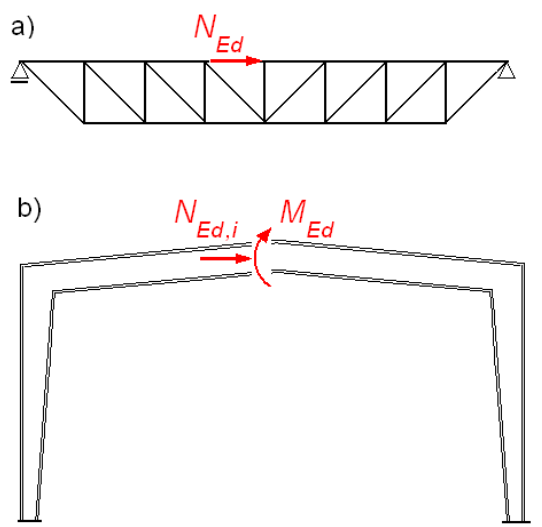
Jeśli jest on ściskany i zginany (rys. 19b), to należy przyjąć taką kombinację siły podłużnej $N_{Ed,i}$ oraz momentu zginającego M_{Ed} , która daje największą wartość siły podłużnej i obliczyć ze wzoru

$$N_{Ed} = \frac{N_{Ed,i}}{2} + \frac{M_{Ed}}{h}, \quad (5)$$

gdzie:

$N_{Ed,i}$ – siła podłużna w analizowanym przekroju ryglu dachowego,

M_{Ed} – maksymalny obliczeniowy moment zginający w ryglu dachowym.



Rys. 20. Schematy wyłączenia stabilizowanego pasa: a) kratownicy, b) dźwigara pełnościennego

W obliczeniach płatew, które są elementami stężenia, należy oprócz ich zginania uwzględnić ściskanie od sił stabilizujących. Jeśli kratownica stężąca składa się z jednakowych przedziałów o długości a , to statecznościowa siła skupiona F , przekazywana przez jedną ściskaną płatew na tężnik wynosi

$$F = 8aN_{Ed} \frac{e_0 + \delta_q}{L^2}. \quad (6)$$

Największe obciążenie pośrednich płatew i łączników (poza stężeniem), które wystąpi w przedostatnim polu, można obliczyć ze wzoru

$$F_m = \sum_{i=1}^m 8aN_{Ed} \frac{e_0 + \delta_q}{L^2}. \quad (7)$$

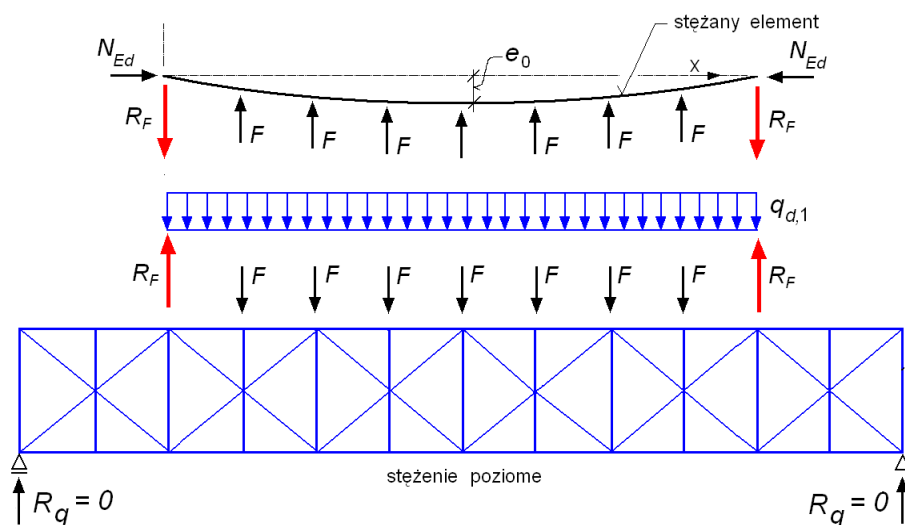
Najbardziej jest obciążona płatew skrajna (okapowa) przekazująca na stężenie poprzeczne reakcje podporowe R_F z m stężanych elementów. To obciążenie płatwi okapowej R_{Fm} wynosi

$$R_{Fm} = \sum_{i=1}^m 4a N_{Ed} \frac{e_0 + \delta_q}{L}. \quad (8)$$

2.3.2. Reakcje podporowe połączeniowych stężeń poprzecznych

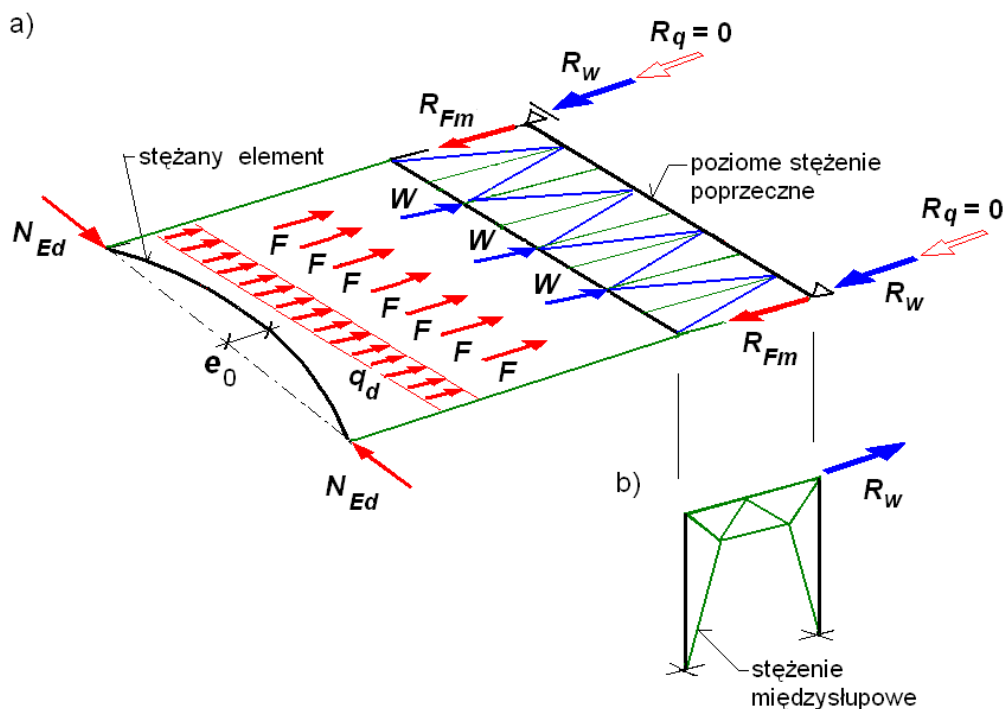
Wyjaśnienia wymaga sprawa reakcji podporowych poprzecznych stężeń połączeniowych, które są przekazywane na słupy i międzysłupowe stężenia pionowe budynków halowych. Zagadnienie to stosunkowo często jest błędnie interpretowane nie tylko projektach, ale również w publikacjach.

Układ konstrukcyjny składający się z m stabilizowanych elementów połączonych płatwiami (w tym płatwiami okapowymi) z poziomym stężeniem poprzecznym jest samorównoważony i nie jest aktywny zewnętrznie, co przedstawiono na rys. 21. Płatwie pośrednie przekazują siły imperfekcyjne F (od obciążeń q_d) na poziome stężenie poprzeczne, płatwie okapowe zaś przejmują reakcje R_F tych oddziaływań imperfekcyjnych. W efekcie tego reakcja podporowa stężenia $R_q = 0$.



Rys. 21. Obciążenia i reakcje podporowe jednoprzęsłowego stężenia poprzecznego

Dachowy układ konstrukcyjny składający się z płatwi i poziomego stężenia poprzecznego jest „zamknięty”. Dlatego siły imperfekcyjne F stężanych rygli dachowych i ich reakcje R_F nie są czynne dla elementów nienależących do układu, z którego pochodzą (rys. 21, 22a). Stąd pozioma sumaryczna reakcja m stężanych elementów R_{Fm} (od ich oddziaływań imperfekcyjnych q_d) nie przekazuje się na słupy i stężenie międzysłupowe budynku halowego ($R_q = 0$). Połaciowe stężenie poprzeczne dachu przekazuje na słupy i stężenia międzysłupowe tylko reakcje R_W od oddziaływań wiatru działającego na ściany szczytowe budynku halowego – co pokazano na rys. 22b.

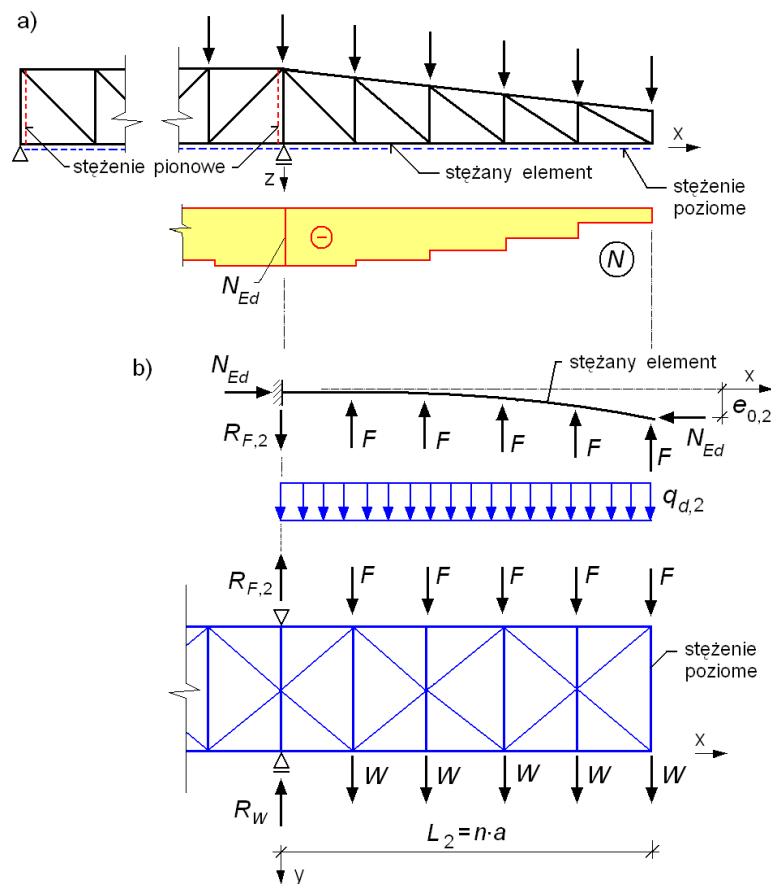


Rys. 22. Obciążenia i reakcje podporowe stężeń hali; schemat obciążenia: a) poziomego stężenia poprzecznego, stężenia międzysłupowego

W podsumowaniu należy stwierdzić, że w klasycznych rozwiązaniach hal, połaciowe stężenie poprzeczne przekazuje na jego pionowe tężniki międzysłupowe tylko reakcje R_W od oddziaływań wiatru z ścian szczytowych (ewentualnie od suwnic podwieszonych do dachu budynku halowego), co pokazano na rys. 22.

2.3.3. Wspornikowe stężenia poprzeczne dźwigarów dachowych

Zasady obliczania poprzecznego stężenia dachowego podane w PN-EN 1993-1-1 dotyczą tylko dźwigarów jednoprzęsłowych. W przypadku np. zadaszeń ramp załadunkowych, trybun stadionów, wiat stosuje się dźwigary dachowe o schemacie wspornika (rys. 23a). W takich rozwiązaniach konstrukcyjnych stężenie poprzeczne dźwigarów ma schemat kratownicy wspornikowej (rys. 23b), a stabilizowane elementy są ściskane siłami o rozkładzie quasi-półparabolicznym. Przypadek taki nie jest ujęty w PN-EN 1993-1-1, ani w literaturze przedmiotu.



Rys. 23. Schemat obliczeniowy wspornikowego stężenia poprzecznego

Proponuje się wówczas stabilizowanym, ściskanym elementom dźwigarów dachowych przyporządkować model wspornikowego pręta ściskanego, z wstępnym wygięciem, które odpowiada tzw. imperfekcji krytycznej (o kształcie jego sprężystej postaci wybożenia). Przez analogię do granicznych ugięć elementów wspornikowych w PN-EN 1993-1-1 można przyjąć jego strzałkę

$$e_{0,2} = \alpha_m \frac{L_2}{250}, \quad (9)$$

gdzie:

L_2 – długość wspornikowego elementu stężanego (rys. 23b),

α_m – współczynnik kumulacji wg (2).

Zakłada się, że jest on ściskany maksymalną siłą ściskającą N_{Ed} w stężanym elemencie. Postępując w sposób omówiony dla stężeń dźwigarów jednoprzęsłowych, imperfekcyjne równomiernie rozłożone obciążenie stabilizacyjne $q_{d,2}$ dźwigarów wspornikowych wynosi

$$q_{d,2} = \sum_{i=1}^m 2N_{Ed} \frac{e_0 + \delta_q}{L_2^2}. \quad (10)$$

Siłę ściskającą w stężanym elemencie (kratowym lub pełnościennym ryglu dachowym) N_{Ed} oraz ugięcie δ_q w (10) należy obliczać według zasad omówionych dla stężeń jednoprzęsłowych.

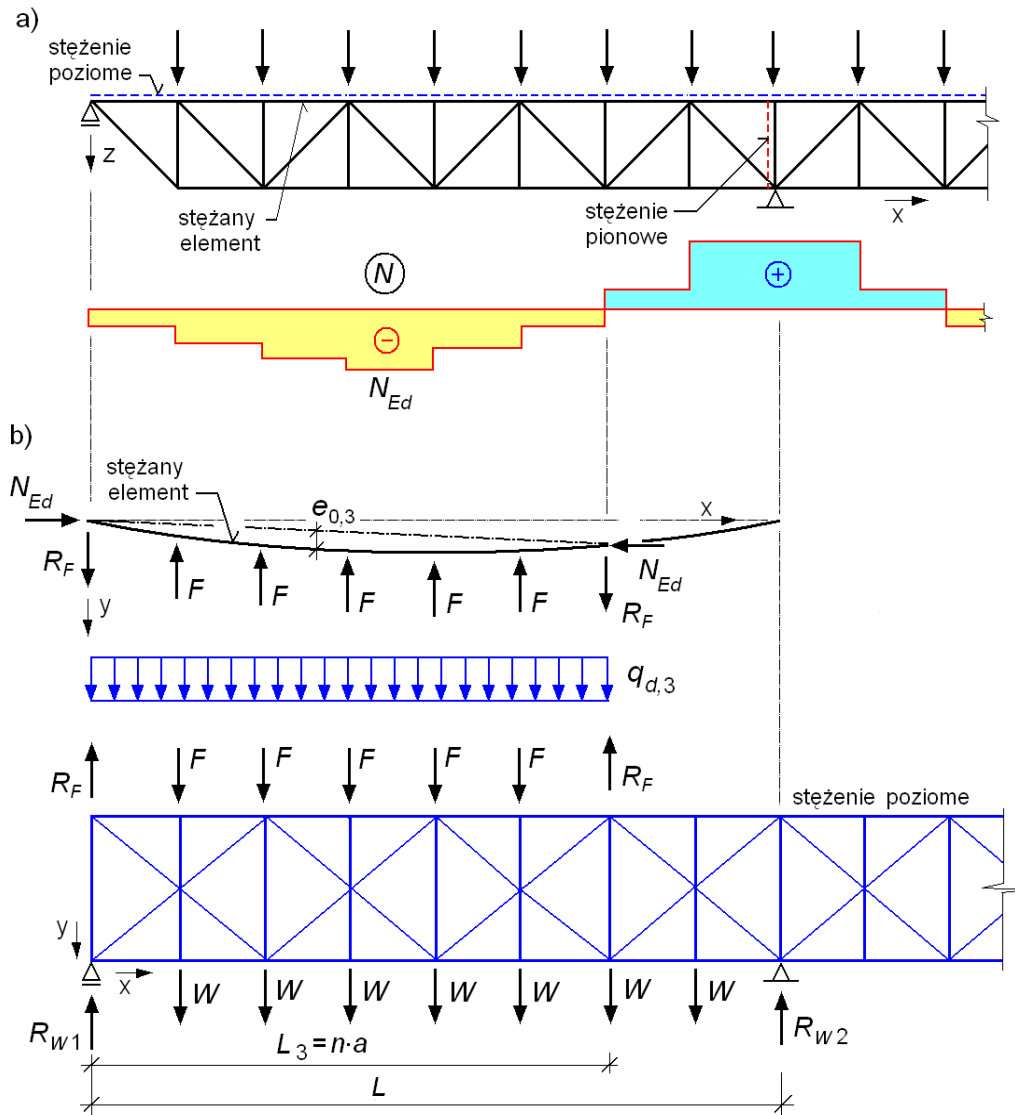
2.3.4. Wieloprzęsłowe stężenia poprzeczne dźwigarów dachowych

Model obliczeniowy stężeń przedstawiony w PN-EN 1993-1-1 dotyczy stabilizowania bocznego elementów ściskanych na całej swej długości. Imperfekcyjne siły stabilizujące powstają w wyniku ściskania stężanego elementu.

W przypadkach np. dźwigarów wieloprzęsłowych (rys. 24a i 25a) usztywniane elementy są nie tylko ściskane, ale również rozciągane. Podobny rozkład sił wewnętrznych w stabilizowanych elementach wystąpi w ramach z sztywnymi połączeniami rygli ze słupami. Wówczas można przyjąć, że na długości, gdzie występuje rozciąganie stężane elementy nie generują oddziaływań na poprzeczne stężenie poziome.

Na rys. 24 i 25 pokazano schematy obliczeniowe stężeń poprzecznych odpowiednio przęsła skrajnego i przęsła pośredniego kratownicy wieloprzęsłowej.

W badanych przypadkach przyjęto wstępne łukowe wygięcie na ściskanym odcinku stężanego elementu (rygla dachowego).



Rys. 24. Schemat obliczeniowy stężenia poprzecznego przęśła skrajnego kratownicy wieloprzęsłowej

W przypadku stężanego ściskanego i rozciąganego pasa górnego w przęśle skrajnym dźwigara dachowego (rys. 24b) proponuje się przyjmować wstępne wygięcie łukowe na długości jego części ściskanej, o strzałce

$$e_{0,3} = \alpha_m \frac{L_3}{500}, \quad (11)$$

gdzie:

L_3 – rozpiętość ściskanej części stężanego elementu (rys. 24b),

α_m – współczynnik kumulacji wg (2).

gdzie:

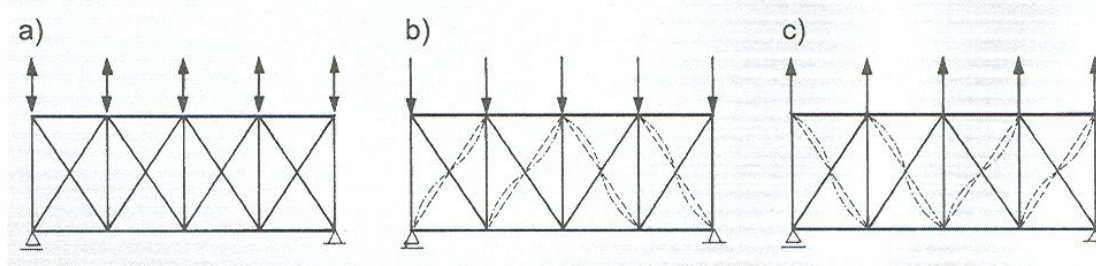
L_4 – rozpiętość ściskanej części stężanego elementu (rys. 25b),

α_m – współczynnik kumulacji wg (2).

W obliczeniach stężeń pokazanych na rys. 24 i 25 należy przyjmować maksymalną siłą ściskającą N_{Ed} w stężanym elemencie wg zasad dotyczących stężeń jednoprzęsłowych. Postępując w sposób omówiony dla stężeń dźwigarów jednoprzęsłowych, imperfekcyjne równomiernie rozłożone obciążenie stabilizacyjne analizowanej konstrukcji $q_{d,3}$ (rys. 24b) i $q_{d,4}$ (rys. 25b) należy obliczać wg (3), przyjmując odpowiednio $e_0 = e_{0,3}$ i $L = L_3$ (w przypadku pokazanym na rys. 24b) oraz $e_0 = e_{0,4}$ i $L = L_4$ (w przypadku pokazanym na rys. 25b).

2.3.5. Obliczanie stężeń prętowych i tarczowych

W analizie statycznie niewyznaczalnych stężeń z wykratowaniem krzyżowym (typu X) najczęściej stosuje się model obliczeniowy uproszczony do schematu statycznie wyznaczalnego (rys. 26). Czyni się wówczas założenie, że wszystkie krzyżulce są smukłe i pod wpływem działania nawet małych sił ściskających ulegają sprężystemu wyboczeniu. Można więc wówczas uważać, że wyłączają się one z przenoszenia przypadających na nie sił. Na rys. 26b fakt ten oznaczono linią przerywaną. Wskutek tego całe obciążenie przypada na krzyżulce rozciągane.



Rys. 26. Schematy obliczeniowe wyłączenia wykratowań stężeń typu X

Przyjęcie takiego modelu obliczeniowego jest uwarunkowane sprężystym wyboczeniem prętów (czyli elementów o smukłości $\lambda \geq 200$), które po zmianie zwrotu obciążenia prostują się i są zdolne przenosić obciążenie rozciągające (patrz rys. 26c).

Takie projektowanie stężeń z wykratowaniem krzyżowym, prowadzi do mniejszego zużycia materiału, niż dla ustroju o modelu z krzyżulcami zabezpieczonymi przed wyboczeniem. Jest sprawą oczywistą, iż w wymiarowaniu pasów rygli dachowych oraz płatwi należy uwzględnić dodatkowe wyężenie tych elementów od sił wewnętrznych, wynikających z pracy ich jako części składowych stężenia.

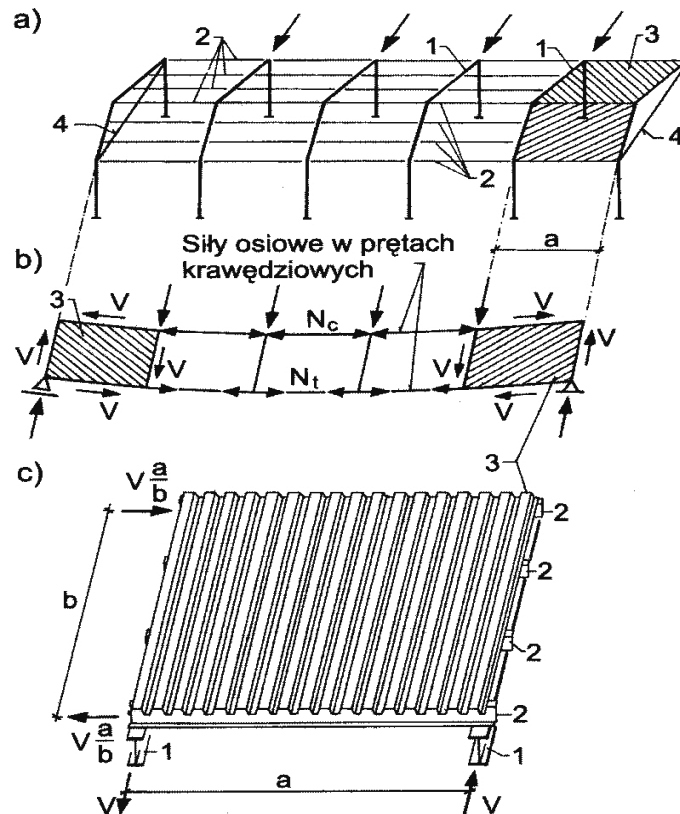
Reakcja stężenia połaciowego poprzecznego jest przekazywana przez pręt skrajny (zwykle jest nim płatew okapowa) na stężenie pionowe międzysłupowe, w linii podłużnej słupów hali.

Rolę tężnika może spełniać nie tylko układ prętowy (tężnik kratowy), ale również konstrukcja tarczowa lub tarczowo-prętowa (rys. 7). Konstrukcje tężników muszą mieć dostateczną nośność tj. przenieść dodatkowe siły imperfekcyjne F_m oraz taką sztywność by wzajemne przemieszczenie sąsiednich punktów podparcia (w rozpatrywanym kierunku) nie przekraczały 0.005 odległości między nimi.

Jako elementy osłonowe dachów oraz ścian hal stosuje się często blachy fałdowe. Charakteryzują się one znaczną sztywnością tarczową (w swojej płaszczyźnie). Współpraca blach fałdowych z prętowym szkieletem nośnym może być wykorzystana w przenoszeniu obciążeń poziomych hali i wówczas zbyteczne są prętowe stężenia połaciowe ich dachu lub ścian. Dodatkowa stężąca rola blach fałdowych i kaset ściennych może być uwzględniona w analizie statycznej hal przy braku obciążeń dynamicznych od suwnic oraz, gdy obiekty te nie są zbyt wysokie, a w ich polach skrajnych nie ma dużych otworów na okna, bramy i drzwi.

W modelu obliczeniowym wyężenia ustroju zakłada się współdziałanie pokrycia z blach profilowanych (fałdowych, kaset ściennych) z prętowym szkieletem nośnym. Tworzą one razem sztywną tarczę pokrycia dachowego lub osłony ściany. Schemat konstrukcji pokrycia dachowego współpracującego z szkieletem prętowym hali pokazano na rys. 27. Taki tarczowy dźwigar (rys. 27b) może zapewnić sztywność i nośność szkieletu konstrukcyjnego w płaszczyźnie dachu lub ściany. W analizach wyężenia ustrój taki traktuje się jak dźwigar złożony ze środnika przenoszącego tylko ścinanie (od obciążeń poprzecznych V) oraz elementów brzegowych stanowiących pasy ustroju, które przejmują tylko siły osiowe (ściskające i rozciągające) od momentu zginającego M . W obliczeniach pokrycia dachowego jako usztywniającej tarczy (tj. wyężenia wynikającego ze współpracy z konstrukcją nośną), dzieli się je na zespoły nazywane przeponami lub diafragmami. Konstrukcję przepony z blach fałdowych pokazano na rys. 7 oraz rys. 27c. Zasadniczymi jej elementami są arkusze blach fałdo-

wych, płatwie lub inne elementy podpierające pokrycie prostopadłe do kierunku rozpiętości pokrycia, dwóch dźwigarów (rygli) podpierających płatwie oraz łączników głównych, uszczelniających i pośrednich (rys. 7). Rolę konstrukcyjną pojedynczej przepony można porównać do pola środkowego zawartego między pasami i żebrami w pełnościennej belce blachownicowej.



Rys. 27. Schemat konstrukcji (a), modelu obliczeniowego (b) i ścinanej tarczy (c) w dachu z blachą fałdową współpracującą z prętowym szkieletem nośnym

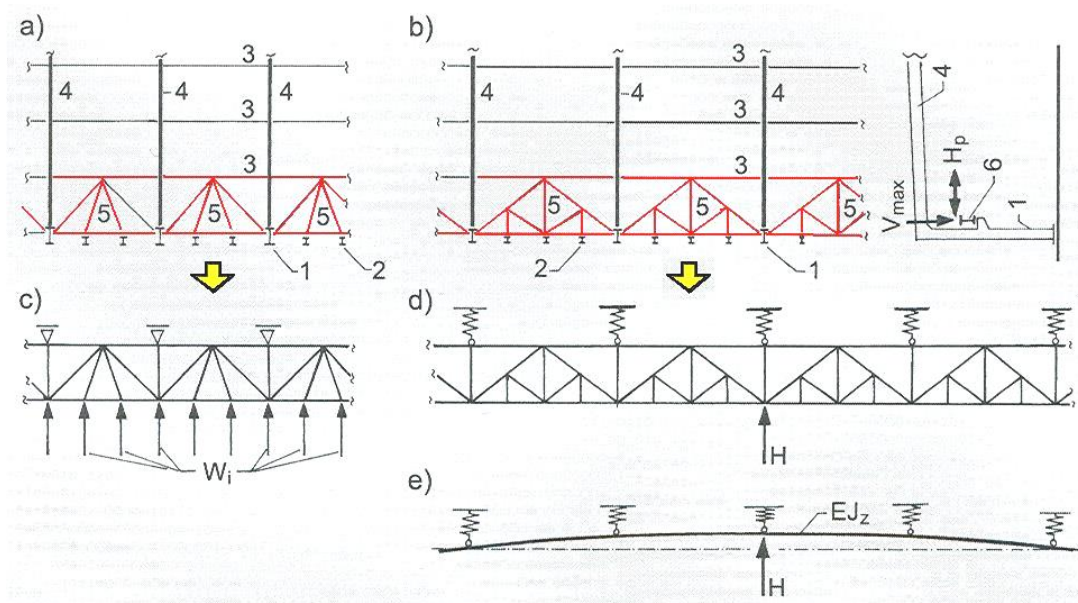
Nośność blach fałdowych na ścinanie w swej płaszczyźnie i zginanie poprzeczne wykorzystuje się również w konstrukcjach tarczownicowych dźwigarów. Tarczownice są to zespoły przepon fałdowych połączone w jedną całość. Stanowią one zwykle połac dachu składającą się z prętowych elementów kalenicowych 2 i okapowych 3, do których łączone są arkusze blach fałdowych 1.

Do określenia sił wewnętrznych w tężniku powłokowym (rys. 7 i 27) przyjmuje się schemat obliczeniowy pokazany na rys. 27c. Siły normalne od momentu zginającego są przenoszone przez prętowe elementy brzegowe. Siły poprzeczne zaś przez blachę fałdową przepon. Współpracę tych dwóch podstawowych elementów tarczowego

stężenia zapewniają łączniki. Oszacowanie nośności przepony z blachy fałdowej wymaga analizy możliwych postaci jej zniszczenia i spełnienia wielu wymagań i zaleceń konstrukcyjnych. W projektowaniu takich stężeń należy określić podatność i nośność tarczy stężącej. Podatność przepony jest sumą jej odkształceń v_i od ścinających obciążeń V działających w płaszczyźnie stężącej tarczy. Składają się na nią podatności na ścinanie wywołane odkształceniem postaciowym blachy fałdowej, płatwi, połączeń głównych, pośrednich i uszczelniających. Nośność przepony ustala się na podstawie analizy nośności połączeń (głównych, pośrednich, uszczelniających) oraz stateczności ogólnej i lokalnej ścinanej blachy fałdowej. Ogólne wymagania dotyczące przepon z blach fałdowych są aktualne również w przypadku projektowania tarczownic.

2.4. Obliczenia statyczne stężeń połącziowych podłużnych

Poziome stężenia połącziowe podłużne są usytuowane w płaszczyźnie pasa górnego lub dolnego rygli głównych ustrojów nośnych (rys. 28). Stanowią one podpory słupów pośrednich i przejmują obciążenie od parcia wiatru na ściany podłużne, przekazując je na główne ustroje nośne.



Rys. 28. Modele obliczeniowe stężeń połącziowych podłużnych: 1 – słup główny, 2 – słup pośredni, 3 – płatew, 4 – rygiel dachowy, 5 – stężenie połącziowe podłużne, 6 – belka podsuwnicowa

W podobny sposób są one wyteżone w sytuacji przejmowania na przykład obciążeń poziomych od oddziaływania suwnicy. Wówczas przekazują one działanie sił poziomych suwnicy na kilka układów poprzecznych. Jeśli tworzą one wraz z tężnikiem połaciowym poprzecznym „zamkniętą” poziomą ramę, to można w analizie statycznej uwzględnić przestrzenne wyteżenie ustroju nośnego hali.

Połaciowe stężenie podłużne projektuje się i oblicza jako kratownice obciążone poziomym oddziaływaniem od wiatru (rys. 28a) i reakcji od suwnicy (rys. 28b). Równoległymi pasami tej kratownicy są dwie płatwie w polu okapowym, krzyżulcami i słupkami natomiast dodatkowe pręty stężeń w tym polu. Rolę podpór tych kratownic spełniają poprzeczne główne ustroje nośne hali. Schematy konstrukcji i modele obliczeniowe stężeń połaciowych podłużnych dachu hali pokazano na rys. 28.

Zgodnie z rys. 28b połaciowy tężnik poziomy oprócz oddziaływania od wiatru W_i przejmuje część obciążenia od suwnicy H_p . Obciążenie to z belki podsuwnicowej przekazuje się na słupy układów głównych hal. W konwencjonalnych obliczeniach przyjmuje się, że to oddziaływanie suwnicy przenosi jeden układ poprzeczny. Takie przyjęcie jest słuszne dla hal z niedużymi wyteżeniami poziomymi od suwnic. Fakt, iż poziome stężenie połaciowe tworzy ciągły, wieloprzęsłowy (kratowy) ustrój nośny umożliwia analizę konstrukcji jako ustroju przestrzennego. Uwzględnienie przestrzennej pracy konstrukcji hali ma sens jedynie przy występowaniu lokalnych obciążeń na długości hali. Taka analiza umożliwia zmniejszenie zużycia stali, a także precyzyjniejsze oszacowania przemieszczeń poziomych głównych ustrojów nośnych. Są one mniejsze od 10 do 20% od obliczonych bez uwzględnienia współdziałania sąsiednich układów poprzecznych. Korzystne efekty takich obliczeń uzyskuje się dla hal, w których występują duże oddziaływania suwnic na ustrój nośny.

Obliczanie układów poprzecznych współpracujących ze sobą, połączonych poziomymi kratownicami przyokapowymi (stężeniami połaciowymi podłużnymi), sprowadza się do obliczania reakcji ciągłej kratownicy stężenia na ustroje nośne (rys. 28d). Wówczas kilka sąsiednich ram poprzecznych bierze udział w przenoszeniu obciążenia poziomego, a nie tylko jedna rama (jak to się przyjmuje w konwencjonalnych modelach obliczeniowych).

W omawianym przypadku ciągłą kratownicę stanowi prętowy tężnik umieszczony w poziomie dolnego lub górnego pasa rygla układu poprzecznego. Sprężyste podpory tej kratownicy stanowią układy poprzeczne. W celu uproszczenia obliczeń tężnik kratowy jest zastępowany belką pełnościenną (o zastępczym momencie bezwładno-

ści J_z) oraz oblicza się podatności ram, które są współczynnikami podatności sprężystych podpór belki (rys. 28e). Wystarczającą dokładność takich obliczeń uzyskuje się analizując współdziałanie pięciu sąsiednich ram w przenoszeniu obciążeń.

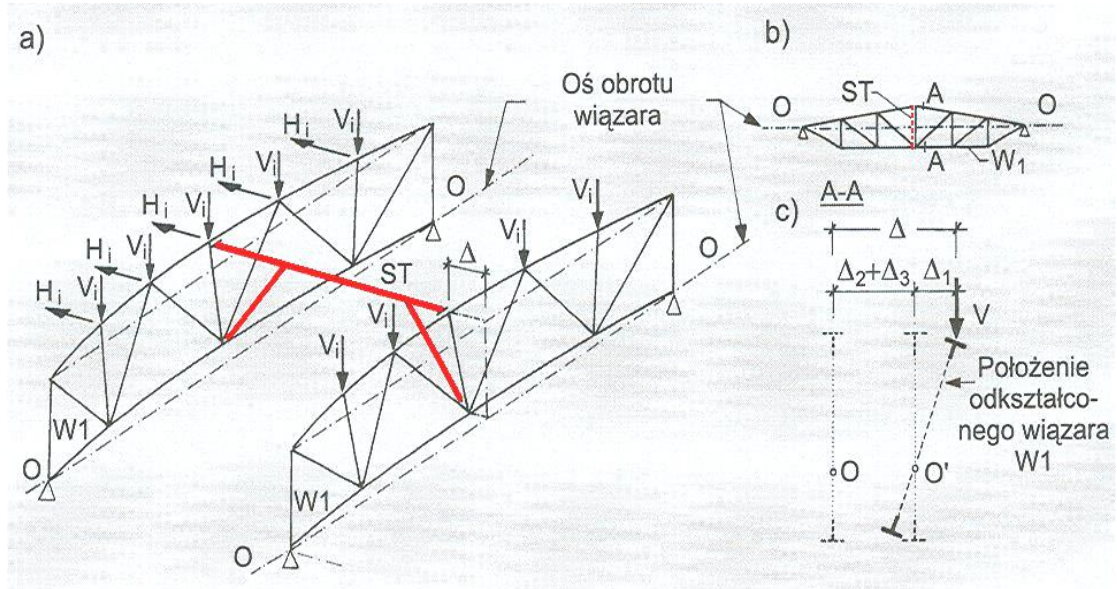
2.5. Obliczenia statyczne pionowych, podłużnych stężeń dachów kratowych

Stężenia pionowe podłużne stosuje się w halach z kratowymi ryglami dachowymi. Służą one między innymi do zapewnienia prawidłowego, wzajemnego ustawienia wiązarów podczas montażu (zabezpieczają kratownice przed skręceniem, pochYLENIEM lub wywróceniem; patrz rys. 29), przeniesienia obciążeń poziomych równoległych do kalenicy, a także stanowią podpory dla tężników połaciowych oraz skracają długości wyboczeniowe pasów rygli dachowych. Są to pionowe ustroje kratowe łączące sąsiednie wiązary dachowe. Pasy górne tych stężeń często tworzą płatwie pełnościenne lub kratowe. Pozostałe pręty tężnika są wykonywane z pojedynczych kształtowników. Niekiedy stosuje się jako tężniki podłużne pionowe niezależne ustroje kratowe.

Zasadniczymi obciążeniami pionowych stężeń podłużnych są poziome oddziaływania skierowane równoległe do kalenicy, przekazywane przez węzły górne i dolne rygli kratowych. Oddziaływania te powstają w trakcie montażu (w wyniku tendencji wiązarów do skręcania, pochYLENIA i obrotu na podporach) oraz od obciążeń przekazywanych na dach podczas eksploatacji obiektu od wiatru i suwnic. Model redystrybucji obciążeń eksploatacyjnych przekazywanych na tężniki pionowe jest stosunkowo złożony. Wynika to z przestrzennego schematu statycznego ustroju, w którym obciążenia poziome przenoszą również tężniki połaciowe poprzeczne i podłużne. Stąd też trudna jest identyfikacja modelu obliczeniowego dla pionowych stężeń podłużnych jako konstrukcji płaskiej. Brak jest zaleceń literaturowych dotyczących zarówno schematów statycznych stężeń, jak i sposobów ustalania ich obciążeń. Najczęściej proponuje się uproszczony sposób projektowania prętów tych stężeń z warunku granicznych smukłości: $\lambda_{maks} \leq 250$ – dla prętów ściskanych i $\lambda_{maks} \leq 350$ – dla prętów rozciąganych.

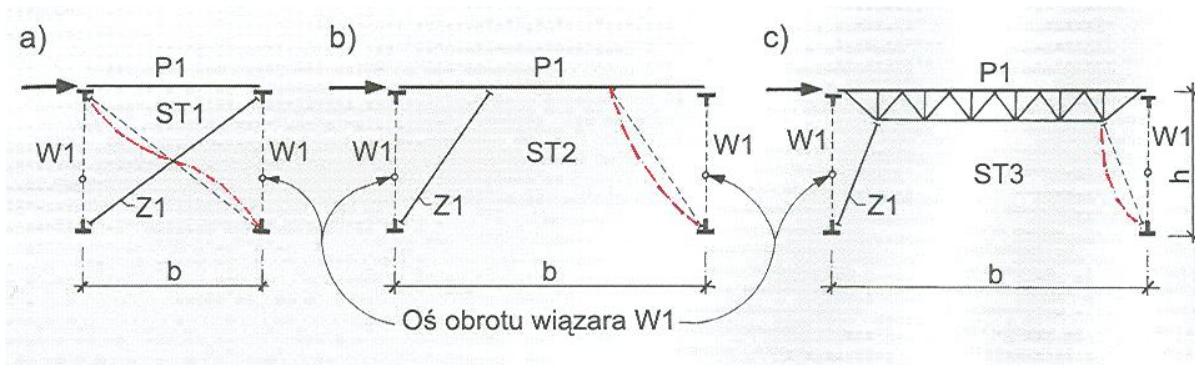
Schemat wytyżenia pionowego tężnika podłużnego dachu kratowego pokazano na rys. 29. W analizie wytyżenia stężeń międzywiązarowych oprócz poziomych obciążeń montażowych i eksploatacyjnych H należy uwzględnić również wpływ obciążeń pionowych V oraz przemieszczeń poziomych konstrukcji i wstępnych losowych

imperfekcji pasów rygli kratowych Δ . W wyniku losowych odchyłek geometrycznych (wykonawczych, montażowych) występują wychylenia od pionu rygli kratowych W1, w miejscu założenia pionowych stężeń podłużnych ST1 (rys. 29a i c).



Rys. 29. Schemat wyłączenia pionowego tężnika podłużnego dachu kratowego: W1 – wiązara, ST – stężenie międzywiązarowe

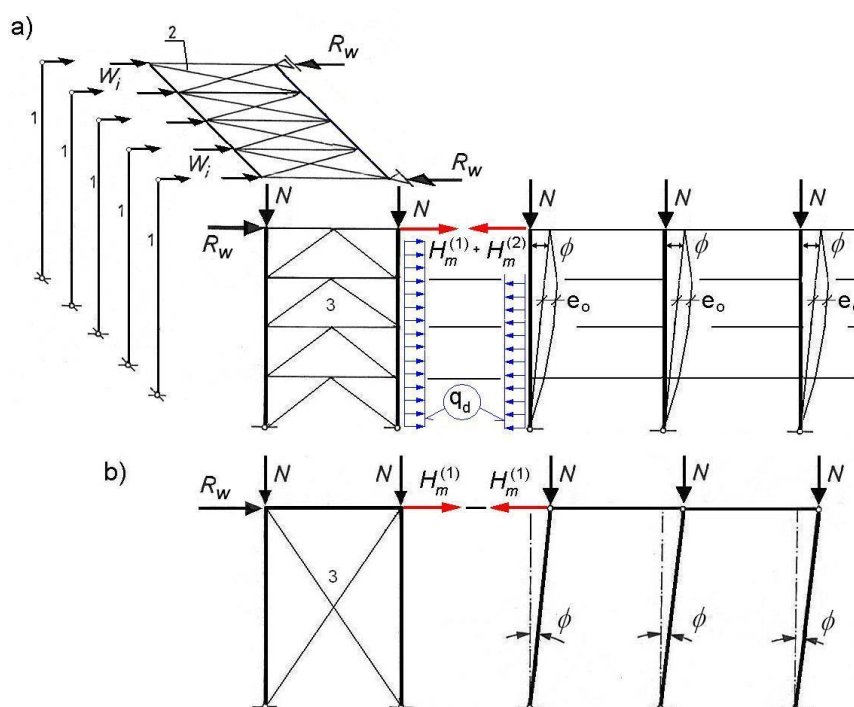
Normowa dopuszczalna strzałka wstępnego wygięcia („sierpowatości”) pasa górnego wiązara wynosi $\Delta_1 \leq \min(l/1000, 3 \text{ mm})$, (gdzie l – rozpiętość dźwigara lub odległość pomiędzy stężeniami). Prócz tego może on być skręcony wzdłuż osi podłużnej tak, iż pas górny jest wychylony od pionu o Δ_2 . Wychylenie poziome pasa górnego wiązara może być spowodowane wygięciem Δ_3 w płaszczyźnie połączenia dachu poprzecznego tężnika połączeniowego, które według normy odbioru konstrukcji stalowych powinno spełniać warunek $\Delta_3 \leq l/200$ (gdzie l – rozpiętość wiązara). Pas górny wiązara może być wychylony od położenia idealnego o $\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3$ (rys. 29c). W takiej sytuacji obciążenie V_i działa skrętnie na analizowany ustrój (rys. 29a), powodując znaczne dodatkowe wyłączenie prętów stężenia (w stosunku do modelu obliczeniowego bez uwzględnienia przemieszczeń Δ). Powstają wówczas dodatkowe oddziaływania pionowe V_F i V_K oraz poziome H_F i H_K przekazywane przez wiązary kratowe na słupy. Model obliczeniowy analizy wyłączenia pionowych stężeń podłużnych o konstrukcjach pokazanych na rys. 30.



Rys. 30. Schematy konstrukcji pionowych stężeń podłużnych: W1 – wiązara, P1 – płatów, ST i – stężenia międzywiązarami, Z1 – pręty zastrzały

2.6. Obliczenia statyczne pionowych stężeń podłużnych słupów hal

Pionowym stężeniom międzysłupowym można przyporządkować schemat wspornika kratowego (lub portalowej ramy kratowej bądź pełnościennej), obciążonej siłami poziomymi od wiatru, suwnic, a od imperfekcji geometrycznych słupów (rys. 31).



Rys. 31. Schemat wyłączenia stężeń międzysłupowych: 1 – słupek ściany szczytowej, 2 – stężenie połaciowe poprzeczne, 3 – rygiel dachowy, 4 – słupek główny, 5 – rygiel ścienny, 6, 7 – pionowe stężenie słupów, 8 – element okapowy

Głównym zadaniem pionowych stężeń w linii słupów jest zapewnienie stateczności konstrukcji nośnej hali w kierunku podłużnym, przejście obciążenia od wiatru W działającego na ściany szczytowe oraz sił poziomych od hamowania suwnic podwieszonych H_{r1} i natorowych H_{r2} , a także przejście oddziaływań przekazywanych przez stabilizowane, podpierane słupy główne i pośrednie.

Obciążenia od wiatru ze ściany szczytowej (rys. 31a), a także podwieszonych do dachu suwnic, w postaci reakcji R_w poprzecznego stężenia połaciowego (poziomej kratownicy), przekazuje się na głowice słupów pionowego stężenia podłużnego hali. Oddziaływania od hamowania suwnic natorowych H_{r2} obciążają pionowe stężenie podłużne słupów hali na poziomie belki podsuwnicowej.

Połączenie ryglami ściennymi i pionowym stężeniem podłużnym słupów głównych i pośrednich hali, skraca ich długości wybozeniowe w płaszczyźnie ścian podłużnych. Ta rola stężenia pionowego podłużnego hali w zapewnieniu korzystniejszego schematu statycznego słupów głównych i pośrednich, jest przyczyną powstawania dodatkowych sił poziomych F_{mi} , obciążających tężnik międzysłupowy. Są to siły F_{mi} występujące w węzłach i prętach poziomych (ryglach ściennych) podpierających stabilizowane słupy – tzw. siły imperfekcyjne. Fizykę powstawania potencjalnych sił F_{mi} w węzłach wymuszających wyboczenie między punktami podparć przedstawiono w p. 2.3. przy omawianiu wyężenia poprzecznych stężeń połaciowych dachu hali. W tym przypadku kratownica stężenia jest wspornikiem, zamocowanym w fundamentach, który oprócz sił pochodzących od imperfekcji słupów F_{mi} (rys. 31b) przenosi także reakcję stężenia połaciowego R_w i oddziaływań H_{r2} . Sposób wyznaczania sił F_0 i F_m jest taki sam, jak przedstawiono dla stężeń połaciowych poprzecznych.

Pionowe stężenie podłużne w linii słupów hal projektuje często jako niezależne ustroje i wówczas rygle ścienne nie są częścią usztywnienia. Taka sytuacja występuje np. zawsze w przypadku hal wielonawowych i wówczas słupy stabilizowane w kierunku podłużnym są połączone tylko rygłem oczepowym (na poziomie okapu dachu). Występujący losowy, wstępny przechył podpieranych słupów głównych i pośrednich sprawia, iż należy w analizie wyężenia omawianego stężenia uwzględnić powstawanie dodatkowej siły poziomej H_n . Siła ta przyłożona jest na poziomie głowic słupów. Do analiz przyjmuje się losowy wstępny przechył słupów ϕ obliczany ze wzoru

$$\phi = \phi_0 \alpha_h \alpha_m, \quad (13)$$

gdzie:

ϕ_0 - wartość podstawowa przechyłu równa $\phi_0 = 1/200$,

α_m - współczynnik redukcyjny ze względu na liczbę słupów obliczany ze wzoru

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 \left(1 + \frac{1}{m} \right)}, \quad (14)$$

α_h - współczynnik redukcyjny ze względu na wysokość słupów obliczany ze wzoru

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}}, \text{ lecz } \frac{2}{3} \leq \alpha_h \leq 1, \quad (15)$$

gdzie: h - wysokość słupa, m - liczba stężanych słupów.

Stężenie międzysłupowe przejmuje siły W_i od wiatru działającego na ścianę szczytową w postaci reakcji R_w , siłę poziomą $H_m^{(1)}$ od imperfekcji przechyłowych m podpieranych słupów w płaszczyźnie ściany podłużnej i siłę $H_m^{(2)}$, jako reakcję od imperfekcji łukowych słupów w płaszczyźnie ściany podłużnej. Jeżeli siła podłużna u góry i -tego słupa ramy wynosi N_{Ed} , to

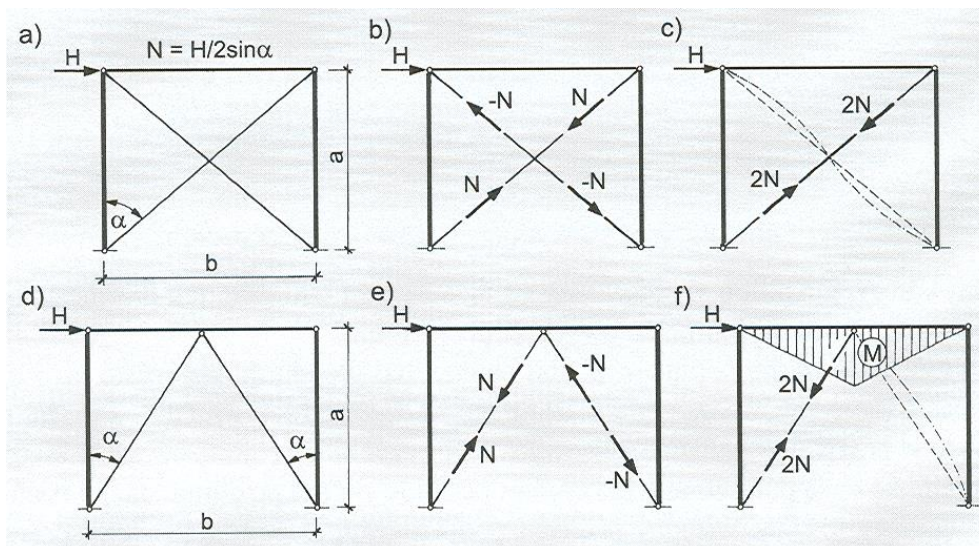
$$H_m^{(1)} = \phi \sum_{i=1}^m N_{Ed}. \quad (16)$$

Siłę $H_m^{(2)}$ oblicza się podobnie jak reakcję R_{Fm} (8) od obciążenia imperfekcyjnego stężenia pałociowego poprzecznego q_d . Korzysta się więc ze wzoru (3), zamieniając w nim rozpiętość przęsła ramy L na wysokość słupa h , sumę sił ściskających - na siłę podłużną N_{Ed} u góry słupa oraz przyjmując strzałkę wygięcia skorelowaną z krzywą wyboczeniową przekroju słupa: dla krzywej a - $e_0/h = 1/350$, dla krzywej a - $e_0/h = 1/300$, dla krzywej b - $e_0/h = 1/250$, dla krzywej c - $e_0/h = 1/200$ i dla krzywej d - $e_0/h = 1/150$. Tak więc siła pozioma od imperfekcji łukowych słupów wynosi:

$$H_m^{(2)} = \frac{4N_{Ed}e_0}{h}. \quad (17)$$

Projektując stężenia pionowe w linii słupów pokazane na rys. 13c, d należy uwzględnić, iż niektóre krzyżulce są ściskane (z uwzględnieniem wybočenja). Pro-
 wadzić to może do zwiększonego zużycia materiału. Stąd też częściej stosuje się
 stężenia z wykratowaniem typu X pokazane na rys. 13a, e i f oraz z wykratowaniem
 typu K pokazane na rys. 13b i g. Projektując takie stężenia można rozpatryć model
 obliczeniowy, gdy w przenoszeniu obciążeń biorą udział pręty ściskane i rozciągane
 lub tylko pręty rozciągane.

Dla stężenia międzysłupowego z wykratowaniem typu X, o schemacie pokaza-
 nym na rys. 32a, w krzyżulcach powstają jednakowe siły, lecz o różnych znakach
 (rys. 32b). Jeśli zaprojektuje się te pręty jako smukłe ($\lambda \geq 200$) to można założyć, iż
 ściskany pręt wyboczy się i wówczas w pręcie rozciągany powstaje dwukrotnie
 większa siła niż w poprzednim przypadku. Jeśli zmieni się kierunek obciążenia po-
 ziomego stężenia H , rozciągany pręt wyboczy się i nie przejmie żadnych sił. Wów-
 czas poprzednio ściskany pręt jest rozciągany i on przejmuje całą siłę skośną. Stę-
 żenie z wiotkimi krzyżulcami (rys. 32c) jest pod względem zużycia materiału korzyst-
 niejsze niż w przypadku układu z krzyżulcami sztywnymi (rys. 32b).



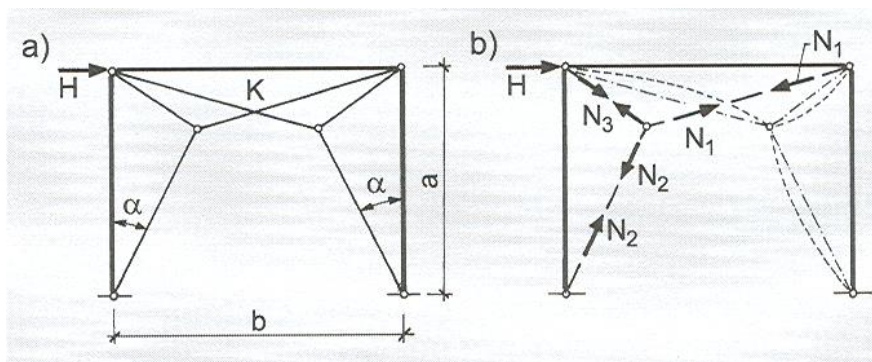
Rys. 32. Schematy wyteżeń pionowych stężeń słupów hal

Podobny model obliczeniowy można rozpatryć w przypadku stężenia typu K, o
 schemacie pokazanym na rys. 32d. Jeśli przyjmie się, iż oba krzyżulce są wyteżone
 to powstają w nich jednakowe siły, lecz o różnych znakach. Projektując te pręty stę-

żenia jako elementy smukłe $\lambda \geq 200$ można przyjąć, iż ściskany krzyżulec wyboczy się sprężysto. Dla takiego modelu obliczeniowego (rys. 32f) w pręcie rozciągającym powstaje dwukrotnie większa siła osiowa niż dla modelu według rys. 32e. Analizowany układ pozostaje dalej geometrycznie niezmienny, lecz w poziomym pręcie stężenia powstaje moment zginający. Wynika on z oddziaływania składowej pionowej siły w rozciągającym krzyżulcu. Z analiz wynika, że projektowanie stężeń z wykratowaniem typu K, o modelu według schematu na rys. 32f wymaga mniejszego zużycia stali niż jego kształtowanie według rys. 32e.

Zginanie poziomego pręta stężenia (rys. 32f) można wyeliminować stosując stężenie portalowe pokazane na rys. 33a. W tym rozwiązaniu konstrukcyjnym pręty krzyżujące się nie są połączone ze sobą w punkcie K i projektuje się je jako smukłe elementy rozciągane.

W modelu obliczeniowym tego stężenia portalowego (rys. 33b) stosując założenia, jak w przypadku stężeń przedstawionych na rys. 32, otrzymuje korzystny rozkład sił wewnętrznych i małe zużycie stali.

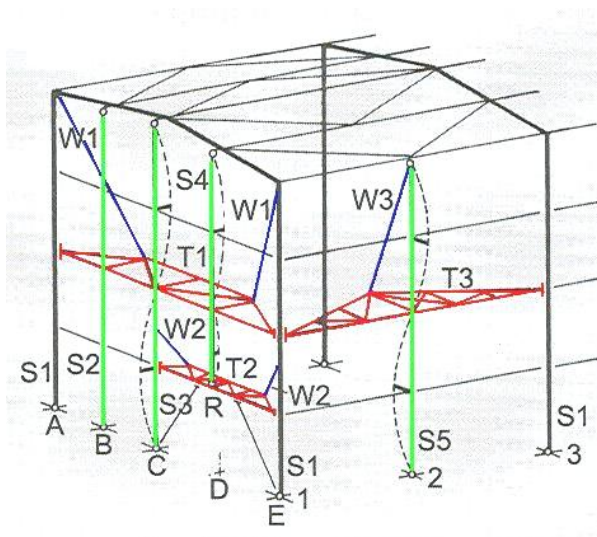


Rys. 33. Schematy wytyżeń portalowego stężenia słupów hal

Omówione analizy wytyżeń usztywnień typu X i K przedstawiono na przykładach jednokondygnacyjnych układów stężających. W przypadku stężeń wielokondygnacyjnych z takimi wykratowaniami np. pokazanych na rys. 13a, b, e wnioskowanie jest takie same, jak przedstawiono omawiając tężniki pokazane na rys. 32. Podobny sposób analizy wytyżenia prętów skratowań można zastosować dla stężeń pokazanych na rys. 13a, b, e-h (modele prętów zabezpieczonych przed wyboczeniem lub po utracie stateczności).

2.7. Obliczenia statyczne stężeń wiatrowych ścian

W halach o dużej wysokości stosuje się dodatkowe podparcia słupów pośrednich ściany szczytowej i podłużnych, którymi są tzw. stężenia wiatrowe pokazane na rys. 34. Są to poziome dźwigary, najczęściej jednoprzęsłowe obciążone poprzecznie oddziaływaniem od wiatru przekazywanym przez słupy pośrednie. Konstrukcję stężeń wiatrowych pokazano na rys. 16. W przypadku, gdy pełnią one rolę pomostu komunikacyjnego należy uwzględnić w obliczeniach ich obciążenie pionowe. Ustroje te są projektowane jako belki pełnościennie, ażurowe, najczęściej zaś jako kratownice (rys. 16). W analizach statycznych wyłączenia ustroju przyjmuje się więc dla tych stężeń adekwatny model belki lub kratownicy, obciążonej odpowiednio zebranymi oddziaływaniami wiatrowymi i użytkowymi.



Rys. 34. Schematy obliczeniowe stężeń wiatrowych

PIŚMIENNICTWO

- [1] Biegus A.: Stalowe budynki halowe. Arkady, Warszawa 2003.
- [2] Biegus A., Mądry D.: Obliczanie stężeń hal stalowych według PN-EN 1993-1-1. „Konstrukcje Stalowe” nr 1/2008, s. 34-37.
- [3] Biegus A. Obciążenie imperfekcyjne stężeń poprzecznych dźwigarów wspornikowych i wieloprzęsłowych, Inżynieria i Budownictwo nr 11/2011, s. 578-581.