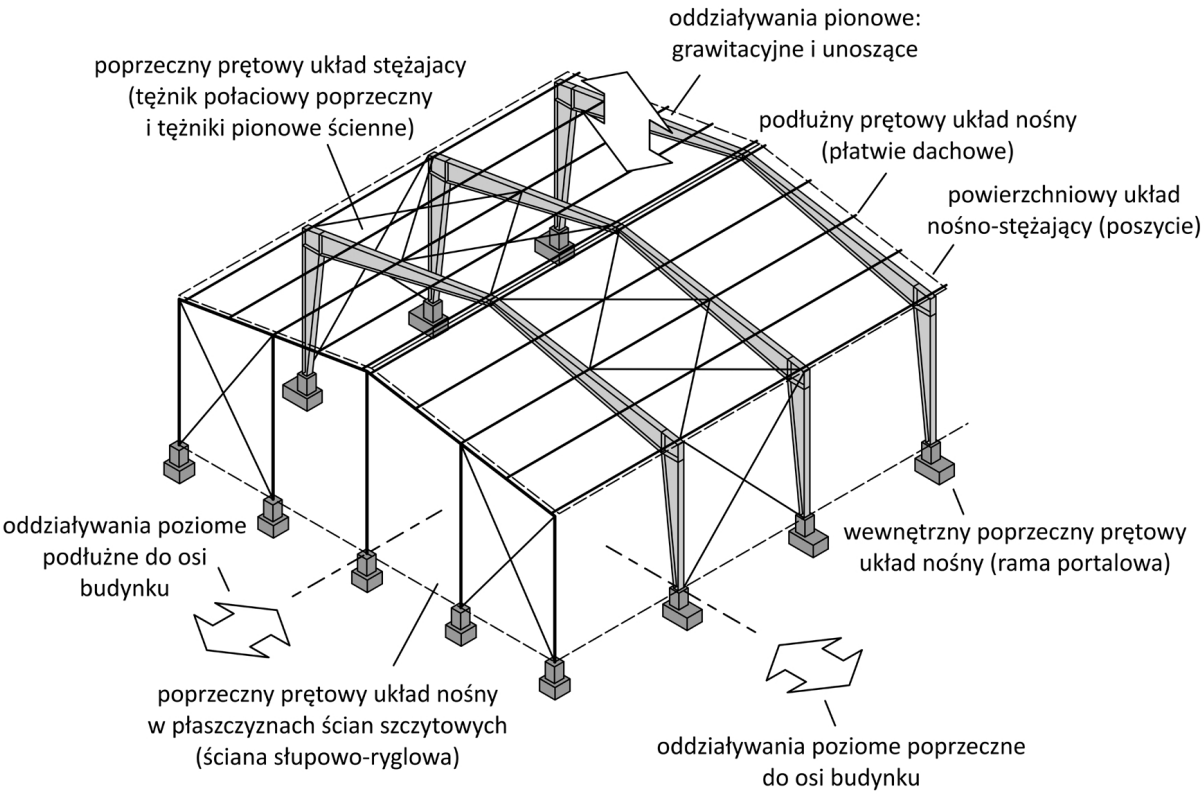
Stalowe hale parterowe

Racjonalne kształtowanie części nośnej i stężającej przestrzennego układu konstrukcyjnego stalowych hal parterowych

Sposób kształtowania układów konstrukcyjnych stalowych hal parterowych na przestrzeni ostatnich dziesięcioleci ulegał ewolucji prowadzącej od podukładów o wyraźnie rozdzielonych funkcjach konstrukcyjnych, do rozwiązań obecnych, w których poszczególne elementy są częściami jednocześnie kilku różnych podukładów konstrukcji: nośnych i stężających. Artykuł poświęcony jest omówieniu zasad racjonalnego kształtowania podukładów nośnych i stężających budynku, prowadzących do uzyskania efektywnej pod względem kosztów, trwałej i bezpiecznej konstrukcji. Szczególną uwagę poświęcono świadomemu wykorzystaniu konstrukcji stężającej, tak aby nie tylko zapewniała lub poprawiała stateczność konstrukcji nośnej, ale by również uzupełniała jej nośność i sztywność w wybranych kierunkach.

Ogólne zasady kształtowania układu konstrukcyjnego

Zadaniem układu konstrukcyjnego dowolnego obiektu jest zapewnienie możliwości przejęcia przez niego wszelkich obciążeń oddziałujących na ten obiekt w trzech prostopadłych względem siebie kierunkach. Aby było to możliwe, konieczne jest, aby układ konstrukcyjny był stateczny pod obciążeniem zadanym w każdym z tych trzech kierunków oraz wykazywał odpowiedni poziom nośności i sztywności, tj. by miał zdolność stawiania oporu na zadane obciążenie. Przyjęta geometria układu konstrukcyjnego i rozmieszczenie nałożonych na niego więzów powinny zapewniać mu geometryczną niezmienność, przynajmniej na poziomie statycznej wyznaczalności. Z kolei przyjęte przekroje poprzeczne prętów konstrukcji w połączeniu z parametrami wytrzymałościowymi ich materiału, powinny zapewniać naddatek zarówno nośności przekroju, jak i poziomu stateczności ogólnej prętów, względem przewidywanych sił wewnętrznych oraz powinny ograniczać deformacje układu konstrukcyjnego do wartości niższych od umownych wartości granicznych. Nośność i sztywność układu konstrukcyjnego zależą nie tylko od przyjętych przekrojów prętów, ale również od parametrów złączy prefabrykowanych i montażowych. Połączenie dwóch kluczowych cech konstrukcyjnych: nośności i sztywności, wyraża się syntetycznym określeniem oporu tej konstrukcji. Opór konstrukcji jest pojęciem ogólnym i dość obszernym, z którego użyciem można spotkać się w obecnie obowiązujących europejskich normach konstrukcyjnych. Zamierzona przez autorów normy ogólność wybranego określenia normowego sprzyja bardziej świadomemu spojrzeniu projektantów na zasady racjonalnego projektowania, w których aspekt zapewnienia odpowiedniej sztywności konstrukcji jest równie istotny, jak aspekt zapewnienia jej odpowiedniej nośności.
Celem artykułu jest omówienie powszechnie stosowanych rozwiązań układu konstrukcyjnego parterowych hal stalowych, w kontekście sposobu zapewniania oporu konstrukcji, ze szczególnym uwzględnieniem logiki podziału układu konstrukcyjnego na podukłady nośne i stężające.



Rys. 1. Podział logiczny układu konstrukcyjnego jednonawowej hali stalowej na wyodrębnione podukłady nośne i stężające, usytuowane poprzecznie i podłużnie do osi budynku

Podział funkcji układu nośnego i stężającego

Stalowe hale parterowe wznoszone są najczęściej na planie prostokąta, a ich układ konstrukcyjny rozmieszczany jest na ortogonalnej siatce modularnej, w której dominują dwa kierunki: poprzeczny i podłużny do osi budynku. Ze względu na kierunki rozmieszczenia układu konstrukcyjnego rozpatruje się oddziaływania na budynek zgodne z tymi kierunkami: pionowe (grawitacyjne i unoszące od wiatru), poziome podłużne do budynku, przechyłowe od wiatru oraz poziome poprzeczne do budynku, również przechyłowe (rys. 1). Całość układu konstrukcyjnego hali stalowej złożona jest z podukładów konstrukcyjnych, które z uwagi na funkcję można podzielić na nośne i stężające [1, 3, 4]. Na rys. 1 pokazano ogólny podział logiczny układu konstrukcyjnego hali, z wyodrębnionymi najważniejszymi podukładami nośnymi i stężającymi. Są to: poprzeczny i podłużny prętowy układ nośny, poprzeczny i podłużny prętowy układ stężający oraz powierzchniowa konstrukcja nośno-stężająca poszycia budynku. Każda z wyodrębnionych części jest w równym stopniu ważna do prawidłowego i kompleksowego zapewnienia stateczności zbiorczego układu konstrukcyjnego pod obciążeniem.

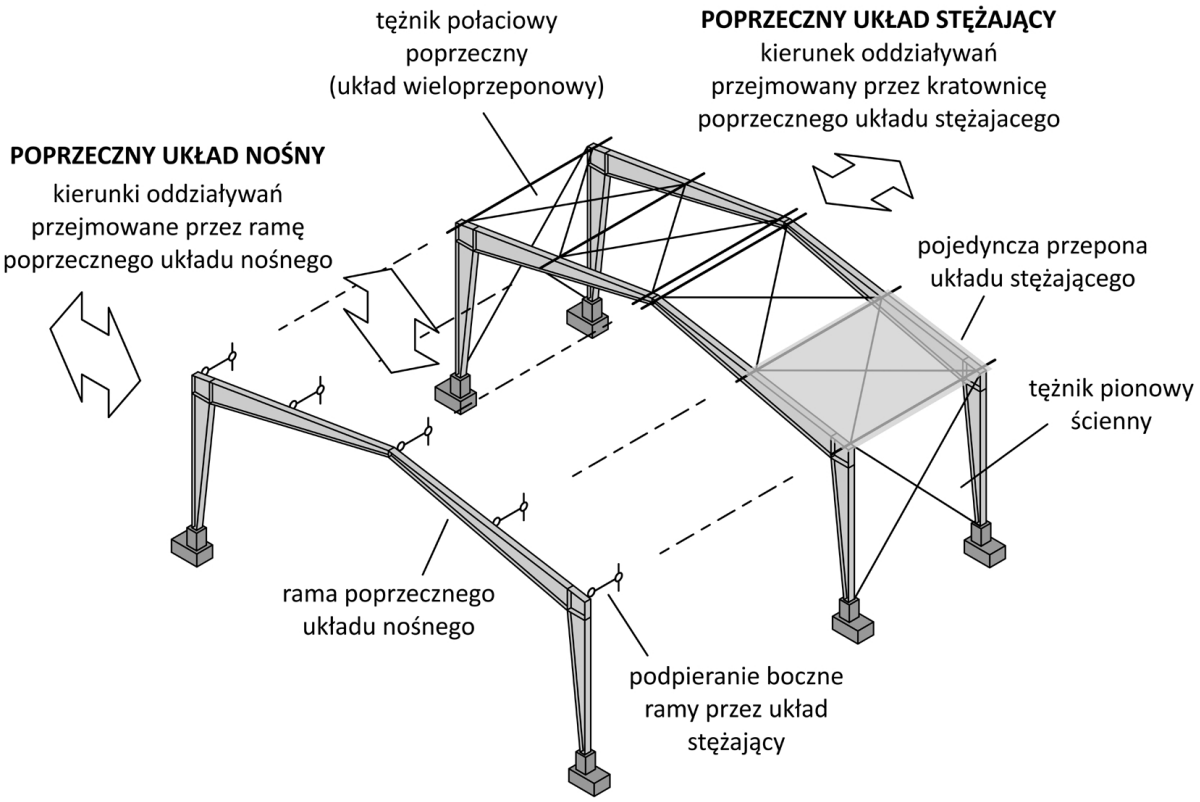
Szczegółowego wyjaśnienia wymaga omówienie zasadniczych różnic pomiędzy podstawowymi funkcjami podukładów nośnych i stężających. Dla wielu projektantów rozróżnienie funkcji tych podukładów nie zawsze jest oczywiste i często ma charakter raczej intuicyjny. Powszechnie przyjmowane kryterium, w którym układ nośny to ta część konstrukcji, która odpowiada wyłącznie za odpowiednią nośność, a układ stężający ma zapewniać odpowiednią sztywność, jest zbytnim uproszczeniem problemu. W rzeczywistości oba podukłady muszą wykazywać zarówno oczekiwaną nośność, jak i sztywność.

Układy nośne konstrukcji budynku mają zapewniać odpowiednią nośność i sztywność na obciążenie oddziałujące w jednym określonym kierunku (np. słupy, belki) lub w dwóch kierunkach w określonej płaszczyźnie (np. ramy). Układy nośne najczęściej usytuowane są na tych kierunkach, w których obciążenie oddziałujące na obiekt jest wiodące lub na które przestrzenny układ konstrukcji przekazuje znaczne siły wewnętrzne. Układy nośne wykazują sztywność tylko w wybranych kierunkach i dlatego wymagają uzupełniającego podparcia przez inną konstrukcję w kierunkach pozostałych. Układy te mogą również samodzielnie i całościowo zapewniać nośność i sztywność we wszystkich trzech ortogonalnych względem

siebie kierunkach obciążenia, przy czym takie rozwiązania są stosowane rzadziej. Najczęściej, jeśli jest to możliwe, takie rozwiązanie zamieniane jest na układ złożony z kilku podukładów, w tym kilku nośnych i kilku stężających, z których każdy przejmuje oddziaływania o określonym kierunku.

Przy świadomym projektowaniu, cechą konstrukcyjną układu nośnego, którą powinno się analizować w pierwszej kolejności jest jej sztywność. To sztywność, a nie nośność, warunkuje możliwość przejęcia przez konstrukcję obciążeń zewnętrznych, a dodatkowo ogranicza jej deformację oraz decyduje o rozkładzie sił wewnętrznych. Pośrednio z cechy sztywności wynika również cecha nośności. Cechą analizowaną dopiero w drugiej kolejności jest nośność na siły wewnętrzne, choć jest to cecha, od której kluczowo zależy bezpieczeństwo konstrukcji. Weryfikuje się, czy jest ona wystarczająca w rozumieniu metody stanów granicznych. Niestety przez wielu projektantów sztywność konstrukcji nośnej jest analizowana bardzo podstawowo, wyłącznie w kontekście weryfikacji stanu granicznego użytkowalności i błędnie jest traktowana jako mało istotna z punktu widzenia bezpieczeństwa. Najpowszechniej stosowaną metodą pozwalającą na zapewnienie układowi konstrukcyjnemu oporu o oczekiwanej wartości jest probabilistyczna metoda stanów granicznych. Metoda ta przyjęta jest w europejskich normach konstrukcyjnych i wskazana jest w nich jako zalecana metoda analizy konstrukcji. W metodzie stanów granicznych oczekiwany poziom niezawodności projektowanego układu uzyskuje się łącząc obliczeniowo zwiększone oddziaływania $E_d = E_k \gamma_f$ wraz z ich skutkami (siłami wewnętrznymi, deformacjami) z obliczeniowo pomniejszonym oporem konstrukcji $R_d = R_k / \gamma_M$ (nośność i sztywność układu), według nierówności $E_d \leq R_d$. Układy stężające mają charakter uzupełniający i pomocniczy względem układów nośnych. Ich główną funkcją jest podpieranie układów nośnych we wszystkich tych kierunkach, w których układy nośne albo w ogóle nie wykazują sztywności, albo wykazują tej sztywności zbyt mało. W sytuacji, gdy układ stężający zmienia układ nośny samodzielnie chwiejny (mechanizm) w układ geometrycznie niezmienny statycznie wyznaczalny, tj. zmienia mechanizm w konstrukcję, to wówczas mówimy o stabilizowaniu układu nośnego przez układy stężające. Jeśli układ stężający zapewnia samodzielnie stabilnemu układowi nośnemu (statycznie wyznaczalnemu lub niewyznaczalnemu) dodatkowe podparcie, to wówczas mówimy o usztywnianiu konstrukcji nośnej. W swojej zasadniczej funkcji układ stężający ma zatem utrzymywać właściwe położenie układu nośnego w stanie obciążonym i umożliwiać mu osiągnięcie oczekiwanego oporu na tych kierunkach lub w tych płaszczyznach, z których przejmuje on obciążenie. Skutkiem dodatkowego przesztywnienia układu nośnego przez układ stężający jest poprawianie poziomu stateczności ogólnej konstrukcji nośnej.

W wielu konstrukcjach podukład stężający często wykorzystywany jest do zapewnienia nośności i sztywności w wybranych kierunkach obciążenia, wtedy gdy zastosowanie klasycznej konstrukcji nośnej może być droższe lub trudniejsze. Układ stężający ma wówczas funkcje bardzo zbliżone do układu nośnego, a przyporządkowywanie go jako podukładu stężającego w większym stopniu wynika z rodzaju przyjętego rozwiązania, tj. przepony prętowej. Znakomita większość układów stężających, niezależnie od ich przeznaczenia, kształtowana jest jako przepona kratownicowa, tj. układ wykazujący wyłącznie sztywność postaciową w swojej płaszczyźnie (skrępowane przekoszenie) i znikomą sztywność ze swojej płaszczyzny (swobodna deplanacja). Prętowe przepony stężające uzyskuje się najczęściej poprzez dodanie w wybranych polach połaci budynku prętów przekątniowych (krzyżulców stężenia) do ortogonalnego układu nośnego. Pręty układu nośnego są zatem wykorzystywane jako część układu stężającego. Układy stężające najczęściej wykonuje się jako kratownice jednoprzeponowe (np. tężniki ścienne) lub wieloprzeponowe (tężniki dachowe połaciowe).



Rys. 2. Kierunki oddziaływań przejmowane przez poprzeczny układ nośny i poprzeczny układ stężający; stabilizowanie boczne poprzecznego układu nośnego w jego płaszczyźnie; podział kratownicy poprzecznego układu stężającego na przepony

Na rys. 2 przedstawiono podział funkcji oraz korzystną współzależność dwóch kluczowych podukładów konstrukcyjnych hali stalowej: poprzecznego układu nośnego i poprzecznego układu stężającego. Rama portalowa poprzecznego układu nośnego przejmuje wszystkie obciążenia oddziałujące w jej płaszczyźnie. Są to obciążenia pionowe, grawitacyjne i unoszące od wiatru, oraz oddziaływania poziome poprzeczne przechyłowe od wiatru. Rama portalowa wykazuje sztywność i nośność tylko w swojej płaszczyźnie oraz ma pomijalną sztywność w kierunku poprzecznym do swojej płaszczyzny. W tym kierunku rama musi być stabilizowana odrębnym podukładem konstrukcyjnym. Rama układu nośnego podpierana jest bocznie punktowo za pośrednictwem płatwi, które dochodzą do tężnika połaciowego poprzecznego.
Poprzeczny układ stężający ma stabilizować ramę poprzecznego układu nośnego w takim stopniu, by ta była stateczna pod obciążeniem oddziałującym w jej płaszczyźnie. Poza funkcją stabilizującą dla układu nośnego, poprzeczny układ stężający ma dodatkowo funkcję nośną, ponieważ musi przejąć oddziaływania poziome podłużne przechyłowe od wiatru (ciśnienie wiatru na ściany szczytowe). Tężnik połaciowy poprzeczny w połączeniu z tężnikami pionowymi ściennymi jest kratownicą załamaną w planie, w płaszczyznach kolejnych sąsiadujących ze sobą połaci ścian i dachu. Jest on układem złożonym z kilku przepon prętowych. Utrzymanie kształtu układu stężającego, poprzez utrzymanie położenia w przestrzeni jego poszczególnych przepon, zależne jest w całości od sztywności poprzecznego układu nośnego. Układ nośny sam staje się więc istotną częścią swojego układu stężającego.
W dużym uproszczeniu korzystna współzależność układu nośnego i stężającego polega głównie na tym, że tężnik podpiera ramy prostopadle do jego płaszczyzny, z kolei ramy podpierają przepony tężnika prostopadle do ich płaszczyzn.

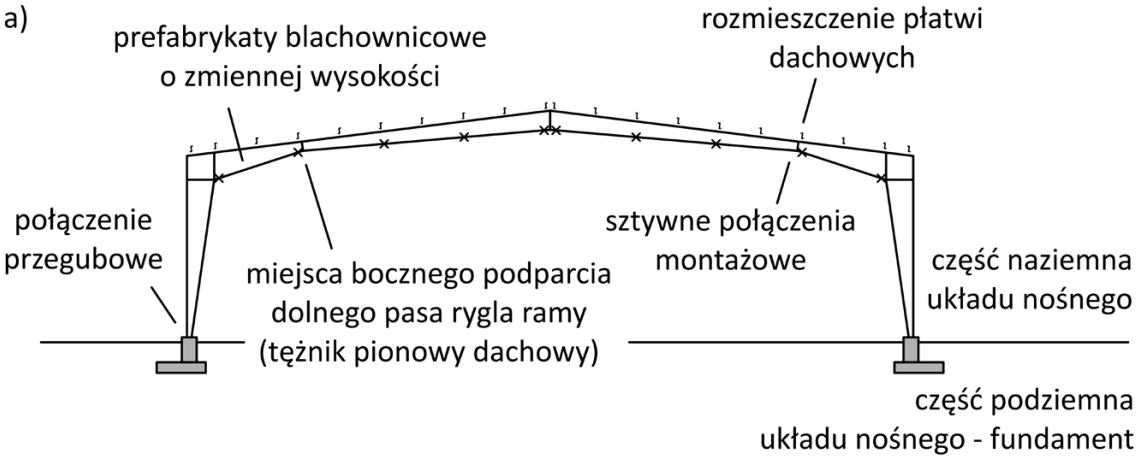
Zasady kształtowania układu nośnego

Poprzeczny układ nośny współczesnych hal może być kształtowany na wiele sposobów. Przy doborze rozwiązania konstrukcyjnego kluczowymi aspektami są: proporcje ramy, jej rozpiętość, wysokość oraz

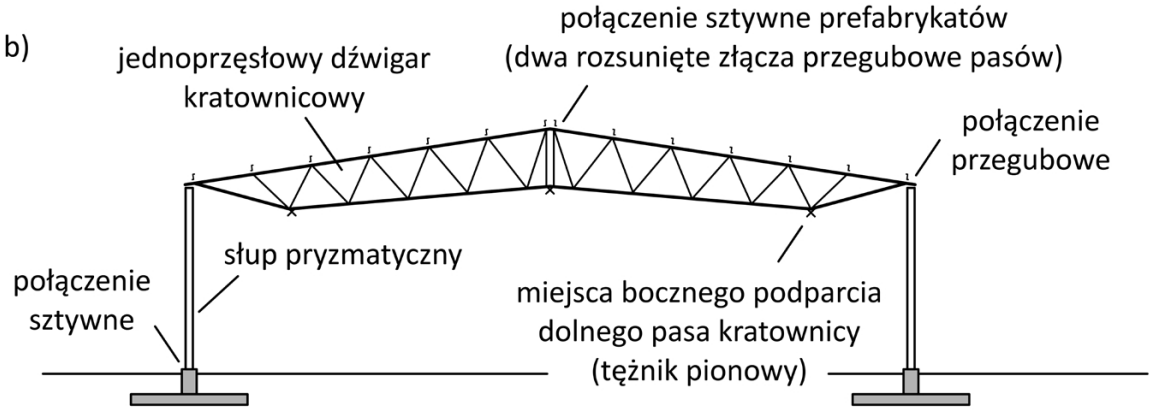
rozstaw, występowanie suwnic, ograniczenie ilości miejsca na konstrukcję dachu, stopień wykorzystania sztywności podziemnej części układu nośnego, tj. fundamentów i bezpieczeństwo konstrukcji w warunkach pożaru konstrukcji. Poprzeczny układ nośny stanowi bezpośrednie podparcie podłużnego układu nośnego, tj. płatwi dachowych i rygli ściennych, o ile te w danej konstrukcji są zastosowane.

Na rys. 3a przedstawiono najczęściej stosowane rozwiązanie poprzecznego układu nośnego współczesnych hal stalowych, tj. ramę portalową. W tym rozwiązaniu rama złożona jest z dwuteowych prefabrykatów blachownicowych o zmiennej wysokości środnika. Prefabrykaty łączone są między sobą na złącza śrubowe doczołowe sztywne na obrót (quasi-sztywne lub półsztywne w rozumieniu normy PN-EN 1993-1-8). Rama łączy się przegubowo z fundamentem. Zmiana wysokości konstrukcyjnej poszczególnych elementów dopasowana jest do rozkładu momentu zginającego w ramie. Przy odpowiednim dopasowaniu kształtu ramy można mówić o projektowaniu trajektoralnym, co oznacza, że we wszystkich częściach ramy uzyskuje się jednakowe wytężenie materiału, więc jest on wykorzystany bardzo efektywnie. Najważniejszą cechą ramy portalowej jest sztywne złącze okapowe, które pozwala na przekazywanie pełnego pola przemieszczeń pomiędzy słupem i ryglem, a tym samym sił i momentów zginających. Wskutek tego słupy i rygle wzajemnie uzupełniają swoją sztywność giętną. Pozwala to na zniwelowanie różnicy wysokości konstrukcyjnej słupa i rygla przy okapie. Konstrukcję dachu można zmniejszyć kosztem zwiększenia konstrukcji ścian.
Naziemna część układu nośnego w całości zapewnia sztywność pod obciążeniem pionowym i na przechył. Część podziemna układu jest oddylatowana obrotowo (złącze przegubowe) i nie krępuje obrotu słupa. Fundament w tym rozwiązaniu jest możliwie najmniejszy, ponieważ zabezpiecza jedynie docisk, unoszenie i rozpór przekazywane z ramy.
W przypadku hal o mniejszych rozpiętościach można stosować kształtowniki walcowane na gorąco typu IPE. Rama jest wówczas złożona z pryzmatycznych prefabrykatów. Wykorzystanie materiału jest nieefektywne, ponieważ najczęściej takie ramy mają materiał wykorzystany w większym stopniu wyłącznie w pobliżu okapów lub kalenicy, zależnie od proporcji wysokości do szerokości ramy.

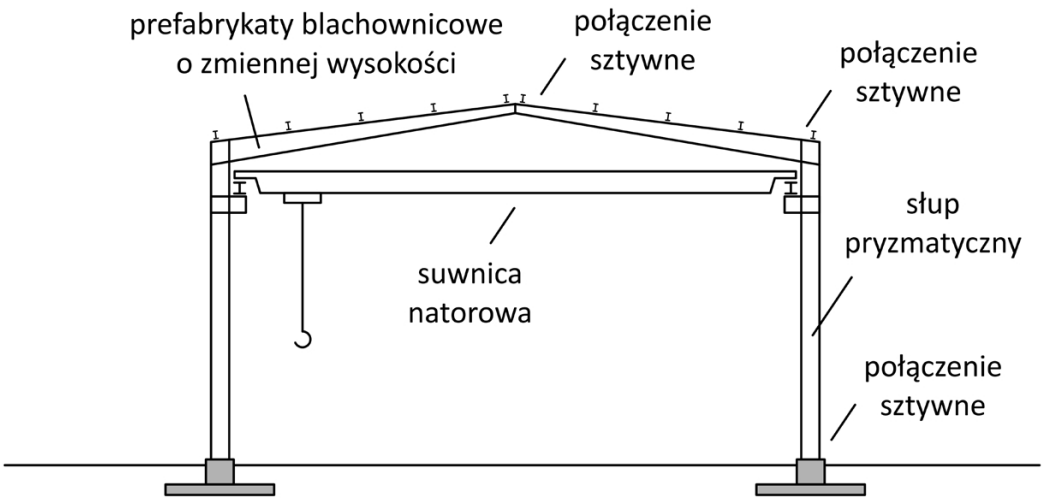
a)


prefabrykaty blachownicowe
o zmiennej wysokości
rozmieszczenie płatwi
dachowych
połączenie
przegubowe
miejsca bocznego podparcia
dolnego pasa rygla ramy
(tężnik pionowy dachowy)
sztywne połączenia
montażowe
część naziemna
układu nośnego
część podziemna
układu nośnego - fundament

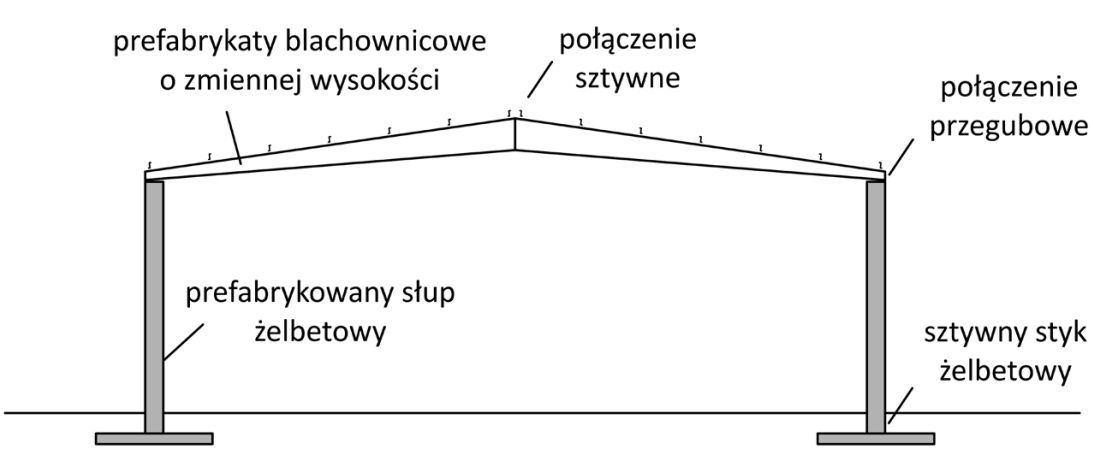
b)


połączenie sztywne prefabrykatów
(dwa rozsunięte złącza przegubowe pasów)
jednoprzęsłowy dźwigar
kratownicowy
połączenie
przegubowe
słup pryzmatyczny
połączenie
sztywne
miejsca bocznego podparcia
dolnego pasa kratownicy
(tężnik pionowy)

c)


prefabrykaty blachownicowe
o zmiennej wysokości
połączenie
sztywne
połączenie
sztywne
słup
pryzmatyczny
suwnica
natorowa
połączenie
sztywne

d)


prefabrykaty blachownicowe
o zmiennej wysokości
połączenie
sztywne
połączenie
przegubowe
prefabrykowany słup
żelbetowy
sztywny styk
żelbetowy

Rys. 3. Przykłady różnych rozwiązań poprzecznego układu nośnego: a) rama portalowa o sztywnych węzłach, oparta przegubowo na fundamencie – hala szeroka a niska, b) układ z ryglem kratownicowym opartym na słupach wspornikowych, c) proporcje hali z suwnicą – hala wąska a wysoka, d) rozwiązanie mieszane stalowo-żelbetowe

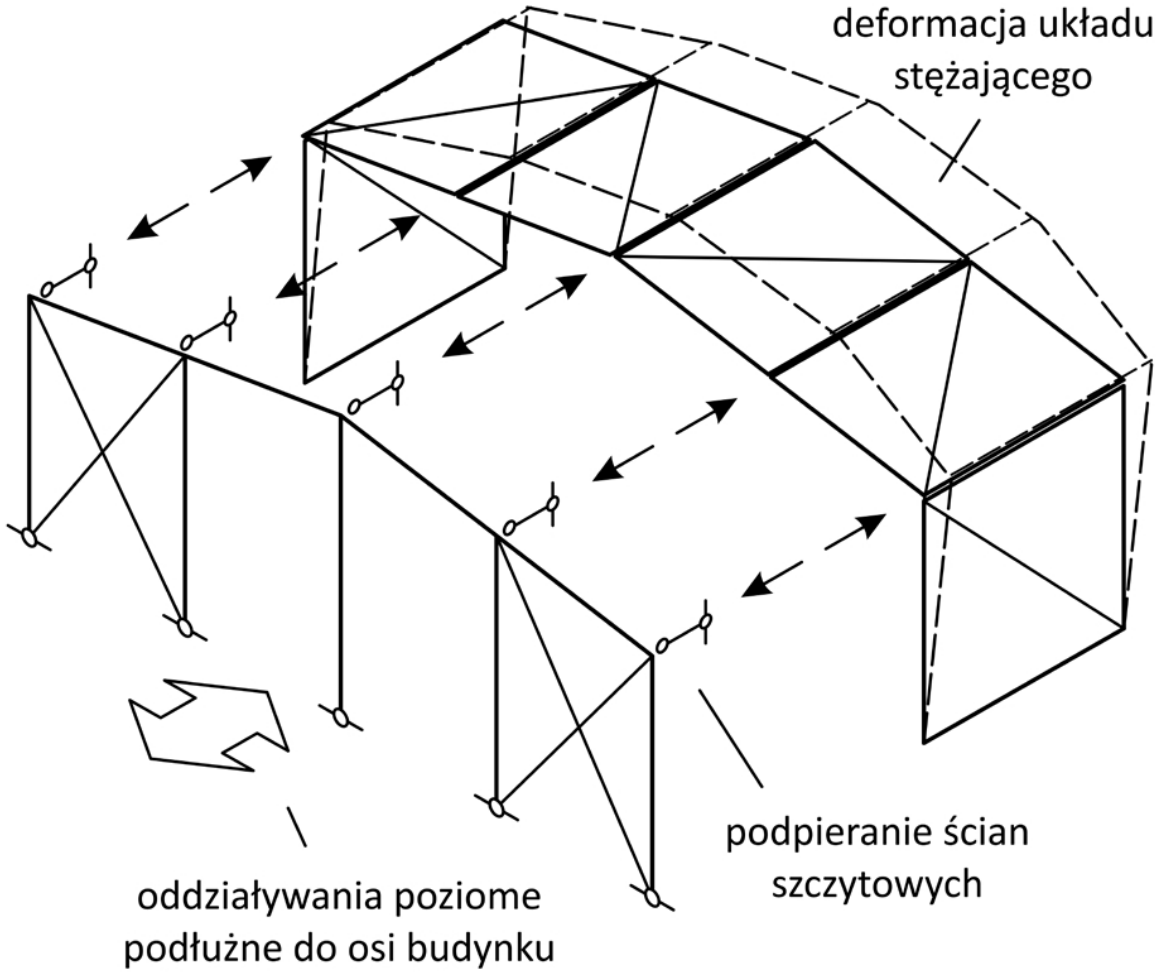
Na rys. 3b pokazano inne, alternatywne rozwiązanie poprzecznego układu nośnego z wykorzystaniem kratownicy w przestrzeni dachu. Aby zmiana układu ramowego na kratownicowy była uzasadniona to w przestrzeni dachu musi być możliwe usytuowanie ustroju o znacznie zwiększonej wysokości konstrukcyjnej. Kratownice są efektywnymi układami nie tylko z powodu większej wysokości konstrukcyjnej – wysokość ta oczywiście pozostaje najistotniejszym parametrem geometrycznym każdej konstrukcji obciążonej poprzecznie (belki), to jednak przede wszystkim z powodu ich kształtu. Optymalne kratownice wykonuje się jako ustroje jednoprzęsłowe o kształcie trapezowym. Kształt trapezu jest bliski parabolicznej zmianie momentu w belce jednoprzęsłowej obciążonej jednorodnie. W opinii większości projektantów pasy kratownic są silnie wytężone w strefie kalenicowej, a skratowanie w strefie przypodporowej. Tymczasem przy świadomym projektowaniu kratownic, przy właściwych proporcjach kształtu trapezowego, tj. przy odpowiedniej rozbieżności pasów i właściwym położeniu przełamania pasa dolnego, uzyskuje się ustrój trajektoralny. Umiejętnie zaprojektowana kratownica ma pasy wytężone jednakowo na całym jej obwodzie, a skratowanie obciążone jest wyłącznie siłami drugorzędnymi. Taki kształt kratownicy pozostaje optymalny wyłącznie wówczas, gdy kratownica pozostanie ustrojem jednoprzęsłowym, a połączenie ze słupami jest przegubowe. Z drugiej strony jednak przegubowa dylatacja obrotu słupa i rygla utrudnia uzyskanie odpowiedniej sztywności przechyłowej. Aby zapewnić układowi odpowiednią sztywność przechyłową, konieczne jest połączenie sztywne słupa z fundamentem o znacznej wielkości. W takiej konstrukcji sztywność przechyłowa zależy wyłącznie od sztywności giętnej słupów oraz sztywności obrotowych złącza i samego fundamentu, a kratownica odpowiada za opór na obciążenia oddziałujące na połać dachu. Fundament słupów wspornikowych jest znacznie większy niż w przypadku ramy opartej przegubowo na fundamencie, ponieważ jest dodatkowo obciążony momentem o dużej wartości.
W poprzecznych układach nośnych z kratownicą jednoprzęsłową i wspornikowymi słupami, w celu poprawienia sztywności przechyłowej można zastosować wiotkie pręty łączące przełamanie dolnego pasa kratownicy ze słupami. Jeśli pręty są wiotkie, to nie zaburzą optymalnego rozkładu sił w pasach pod obciążeniem grawitacyjnym, a znacznie zwiększą sztywność przechyłową przy oddziaływaniach bocznych (słup po stronie nawietrznej ograniczy swoją deformację giętną przekazując obrót na rygiel kratownicowy).

Na rys. 3a i 3b zaznaczono miejsca rozmieszczenia dodatkowych podparć bocznych dolnego pasa rygla pełnościennego i kratownicowego. Podparcia te są realizowane przy użyciu pionowych stężeń dachowych, najczęściej zastrzałów w przypadku ram pełnościennych oraz pionowych kratownicowych przepon międzydźwigarowych w przypadku kratownic. Na tych rysunkach wskazano również, że geometria kilku układów konstrukcyjnych musi być uzgodniona w pięciu miejscach. Z rozkładu płatwi wynika podział ściany szczytowej i tężnika połaciowego poprzecznego. Te płatwie, które są słupkami tężnika połaciowego poprzecznego powinny mieć zgodne położenie ze słupami ściany szczytowej, bo są ich podparciami. Na tych samych płatwiach obowiązkowo powinny występować zastrzały, które periodycznie będą podpierać pas dolny dźwigara ramy. Złącza śrubowe doczołowe należy rozmieszczać w bezpośredniej bliskości zastrzału (mała sztywność obrotowa złącza względem osi słabej wymaga stabilizowania bocznego).

W przypadku hal z suwnicami najczęściej zmieniają się proporcje hali z układu szerokiego a niskiego na układ wąski a wysoki (rys. 3c). Zwiększają się oddziaływania poziome poprzeczne oraz pojawiają się dodatkowe siły od suwnicy [6]. Wraz ze zwiększającą się wysokością hali zwiększa się problem zapewnienia odpowiedniej sztywności przechyłowej ramy. Hale wyposażone w suwnice muszą spełniać znacznie bardziej rygorystyczne warunki stanu granicznego użytkowalności, szczególnie te dotyczące przechyłu ram $(\Delta_y < h_{rail}/400)$ i różnicy przechyłu sąsiadujących ram, tożsamej ze skoszeniem bocznym belek podsuwnicowych $(\delta\Delta_y < L_B/600)$. Często konieczne staje się wykorzystanie sztywności obrotowej fundamentu. Różnica sztywności przechyłowej ramy połączonej przegubowo z fundamentem i takiej samej ramy połączonej z nim sztywno, jest około czterokrotna. W przypadku kształtowania konstrukcji hal z suwnicami, w jednakowym

stopniu wykorzystuje się sztywności części naziemnych układu – słupów i rygla – oraz części podziemnej.

Na rys. 3d pokazano układ mieszany, w którym połączone zostały żelbetowe prefabrykowane słupy wspornikowe ze stalowym jednoprzęsłowym dźwigarem blachownicowym lub kratownicowym. Takie rozwiązanie było stosowane wiele dziesięcioleci temu i ponownie staje się trendem w ostatnim czasie, głównie z powodu niespójnych przepisów dotyczących bezpieczeństwa konstrukcji w warunkach pożaru.

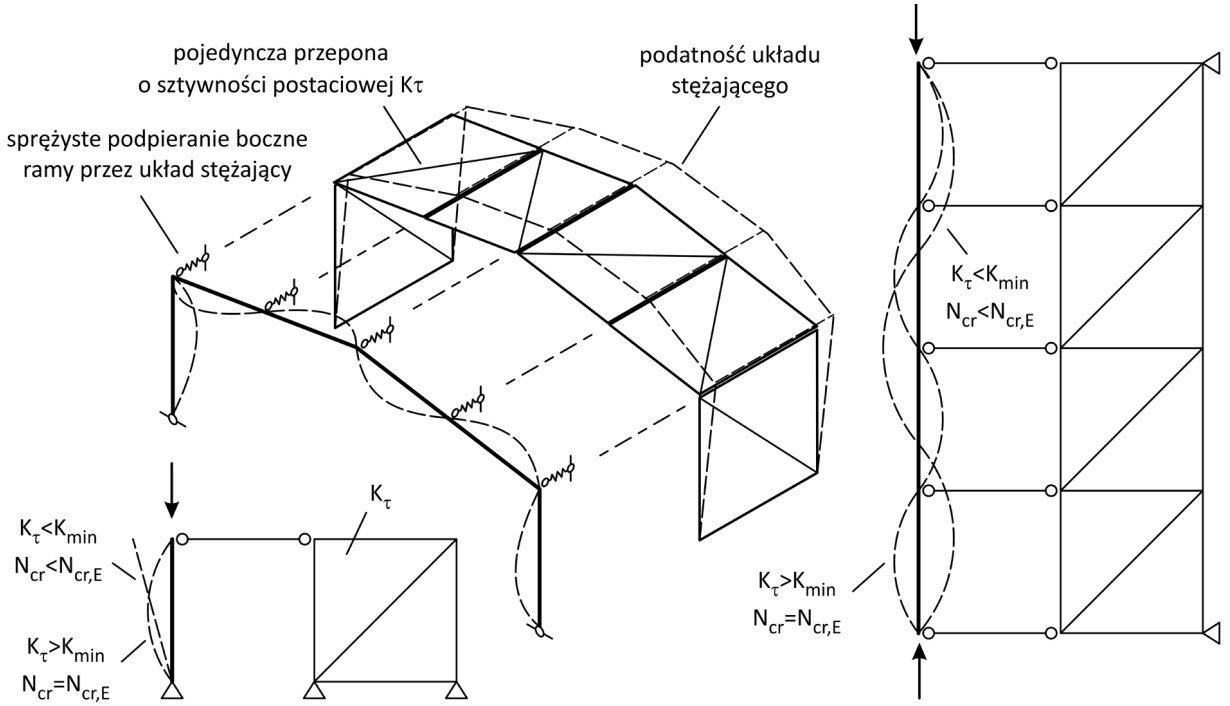


Rys. 4. Model normy europejskiej obciążenia wiatrem poprzecznego układu stężającego

Zasady kształtowania układu stężającego

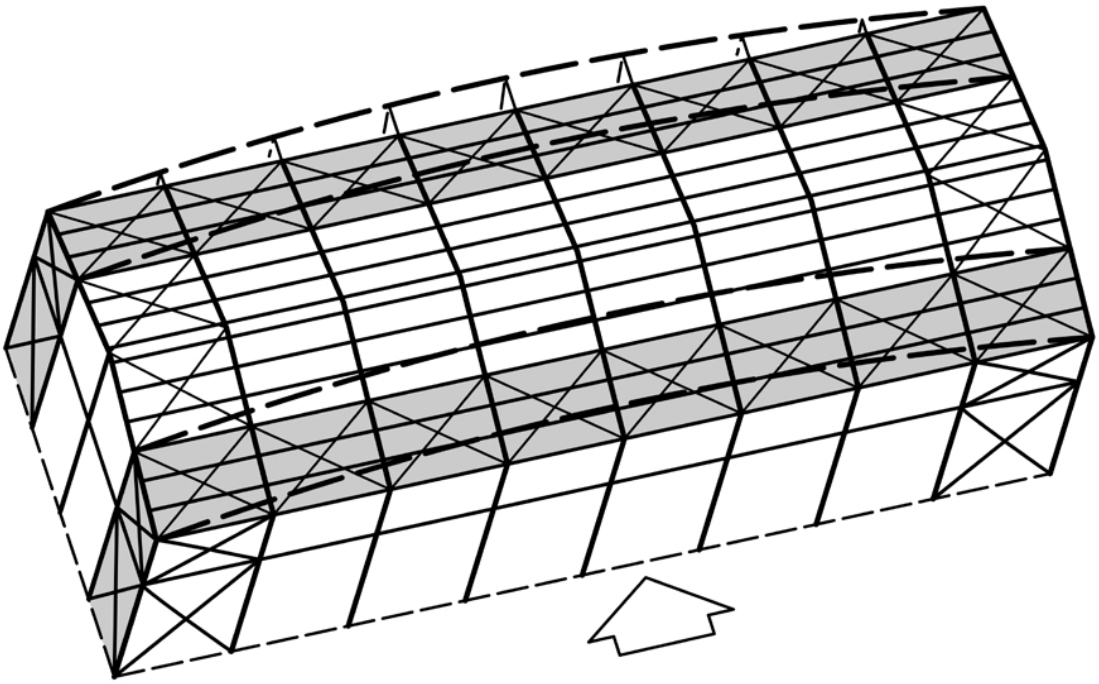
Poprzeczny układ stężający stabilizuje poprzeczny układ nośny oraz przejmuje oddziaływania od wiatru o kierunku podłużnym względem osi budynku. Ściany szczytowe: nawietrzna i zawietrzna, są podpierane o tężnik połaciowy poprzeczny za pośrednictwem płatwi. Na rys. 4 uzasadniono konieczność uzgodnienia geometrii układu płatwi, podziału tężników na przepony oraz podziału ścian szczytowych. Zgodnie z modelem normy europejskiej tężnik połaciowy poprzeczny weryfikuje się na podstawie obciążeń ścian szczytowych od wiatru oraz na podstawie umownych oddziaływań stabilizujących ramy [N1]. Dodatkowo sprawdza się niezbyt rygorystyczny warunek wzajemnego przemieszczenia węzłów kratownicy stężenia *(L_1 / 200)*. Jest to przemieszczenie tożsame z przekoszeniem wyodrębnionej przepony układu. W praktyce projektowej przyjmuje się założenie, że układ stężający zweryfikowany według założeń modelu normy europejskiej gwarantuje odpowiedni poziom podparcia dla układu nośnego, oraz że wskutek tego podparcia, pręty ramy mają długości wyboczeniowe przy wyboczeniu z płaszczyzny ramy równe rozstawowi tych podpór.

Tymczasem wcale to nie jest takie oczywiste. Aby spełnić to założenie, w analizie konstrukcji stężającej, prawidłowej w rozumieniu mechaniki konstrukcji, wyznacza się minimalną wymaganą sztywność postaciową przepon, z których ten układ jest złożony. Tę sztywność wyznacza się na podstawie sztywności układu stężanego (rys. 5) i sił jakie on generuje z chwilą utraty stateczności, a nie na podstawie obciążeń zewnętrznych oddziałujących na układ. Nośność układu stężającego i wartości generowanych sił na niego oddziałujących weryfikowana jest wyłącznie uzupełniająco i w większości przypadków nie jest miarodajna przy doborze przekroju krzyżulców przepony. Taki model obliczeniowy, zgodny z zasadami mechaniki konstrukcji, przyjęto min. w amerykańskiej normie konstrukcyjnej AISC [N2]. Z kolei model weryfikacji układów stężających zaproponowany w normie europejskiej, przeciwnie i dość kontrowersyjnie – skupia się zasadniczo na oddziaływaniach i nośności, a w znikomym stopniu na sztywności. Często układ prawidłowo zweryfikowany w rozumieniu normy europejskiej ma zbyt małą sztywność, by odpowiednio stabilizować układ nośny, w rozumieniu mechaniki konstrukcji.



Rys. 5. Postać wyboczenia giętnego ramy z jej płaszczyzny wymuszona przez układ stężający złożony z przepon o odpowiedniej sztywności postaciowej; model zgodny z założeniami mechaniki konstrukcji i wykorzystany w normie AISC

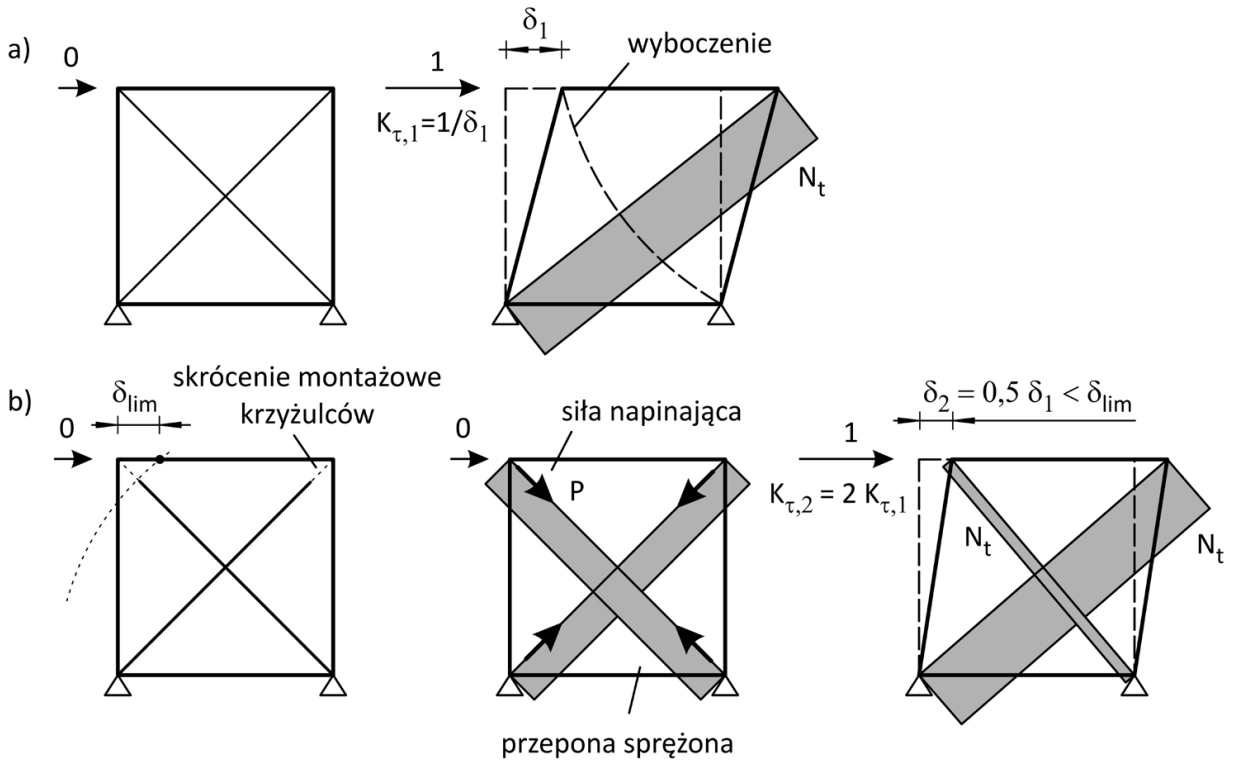
Jeśli sztywność postaciowa przepon układu stężającego jest wystarczająco duża, to układ stężający wymusi taką postać wyboczenia prętów ramy, dla której siły krytyczne poszczególnych prętów będą odpowiadać ich sile Eulera. A takie założenie jest przecież jednym z podstawowych przyjmowanych przy projektowaniu układów nośnych. Gdy sztywność postaciowa przepony będzie mniejsza, to siły krytyczne prętów ramy będą niższe, a tym samym długości wyboczeniowe będą większe od długości wynikającej z periodycznego rozmieszczenia podpór ram. Model zgodny z zasadami mechaniki konstrukcji nie stoi w sprzeczności z założeniami modelu normy europejskiej, dlatego warto go potraktować jako niezwykle racjonalne uzupełnienie tych zapisów. Szczególnie, że w większości przypadków będzie wskazywał na konieczność przyjęcia sztywniejszego układu stężającego niż norma europejska. Ciekawym rozwiązaniem konstrukcyjnym, niestety niezbyt rozpoznanym pod względem swojej skuteczności, jest połaciowy tężnik okapowy (podłużny układ stężający). Tężnik ten albo w ogóle nie jest stosowany, albo jeśli jest, to raczej z powodu zwyczajowego przyjęcia, zgodnie z zasadami sztuki budowlanej. Tymczasem dwa tężniki połaciowe okapowe oparte na tężnikach ścian szczytowych są niezwykle skutecznymi rozwiązaniami zwiększającymi sztywność przechyłową układu nośnego. Szczególnie dotyczy to ram wysokich i wyposażonych w suwnicę.



Rys. 6. Wpływ podłużnego układu stężającego na sztywność przechyłową poprzecznego układu nośnego

Na rys. 6 pokazano wspólne deformowanie się ram i tężników połaciowych okapowych pod obciążeniem bocznym od wiatru. Układ tężników podłużnych przy oddziaływaniach przechyłowych znacząco zmniejsza wytężenie naroży ram oraz ich deformację. Dodatkowo w przypadku dachów dwuspadowych o dużym nachyleniu tężniki okapowe istotnie zmniejszają rozpór ram, a tym samym momenty zginające w ich narożach, analogicznie jak w przypadku ram ze ściągiem. Układ stężający podłużny doskonale niweluje wzajemny przechył ram w halach z suwnicami, a jest to najbardziej newralgiczna deformacja tego typu obiektu.

Większość przepon układów stężających projektuje się obecnie z wykorzystaniem krzyżulców wiotkich. Są one bardzo wygodne pod względem montażu i umożliwiają wykonanie wstępnego lub pełnego napięcia. Choć wstępne napinanie krzyżulców jest zabiegiem dość powszechnym, to jednak rzadko jest uwzględniane w analizie statycznej. Tymczasem korzystnie wpływa na sztywność, która jest kluczową cechą konstrukcyjną układu stężającego. Na rys. 7a pokazano równowagę statyczną stężenia pasywnego, tj. bez napinania krzyżulców wiotkich. Pod obciążeniem przepony jeden z krzyżulców prowadzi siłę rozciągającą i pozostaje stateczny. Drugi krzyżulec traci stateczność, a tym samym traci zdolność stawiania oporu na obciążenia. Sztywność postaciowa przepony wynika wówczas wyłącznie ze sztywności podłużnej tylko jednego krzyżulca. Sztywność przepony w głównej mierze zależy od sztywności krzyżulców, ponieważ pozostałe pręty ściskane składające się na przeponę wykazują względem krzyżulca podatność mniejszą o jeden rząd.



Rys. 7. Równowaga statyczna i sztywność przepon z krzyżulcami wiotkimi: a) pasywnych, b) sprężonych

Krzyżulce wiotkie można napiąć na etapie montażu wykorzystując m.in. skrócenie montażowe (rys. 7b). Napięcie prętów wiotkich spowoduje sprężenie przepony. W praktyce projektowej powszechnie przyjmuje się wstępną siłę napinającą *P* równą około 15% nośności pręta na rozciąganie. Jednak, aby uzyskać pełną sztywność stężenia, siłę napinającą $_P$ powinno się przyjmować większą, tak aby pod pełnym obciążeniem oba krzyżulce były rozciągane i pozostały stateczne. Jeśli oba krzyżulce pozostają stateczne, to sztywność postaciowa przepony wzrasta dwukrotnie. Można więc uzyskać dwukrotny wzrost sztywności układu stężającego, bez zwiększania kosztu tej konstrukcji. Co ciekawe, nawet duże, lecz optymalne napięcie krzyżulców w ogóle nie zwiększy ich wytężenia w przeponie obciążonej, w odniesieniu do obciążonej przepony pasywnej. Siły rozciągające w krzyżulcu wydłużanym pozostają te same, więc powszechna praktyka projektowa, w której nośność tego krzyżulca na rozciąganie redukuje się o wartość siły napinającej, jest błędna.

Wpływ poszycia

Szczególną rolę w układzie stężającym budynku ma jego poszycie, które jest przeponą tarczową o bardzo dużej sztywności. Sztywność postaciowa poszycia powszechnie jest uwzględniana przy projektowaniu płatwi dachowych. Może jednak być ona również korzystnie uwzględniona w projektowaniu poprzecznego układu nośnego [2], dokładnie w ten sam sposób, jak można uwzględnić tężniki połaciowe okapowe (podłużny układ stężający). Metoda projektowania określana mianem *skin-design*, w której uwzględnia się sztywność postaciową poszycia, pozwala na znaczne zmniejszenie przechyłu ram budynku od wiatru bocznego, szczególnie w przypadku ram wąskich a wysokich, a w przypadku dwuspadowych połaci dachowych o większym nachyleniu, istotnie zmniejsza się rozpór ram.

Podsumowanie

Świadome projektowanie i wykorzystanie właściwości układu stężającego pozwala na istotną redukcję niezbędnej wielkości układu nośnego. Bardzo często wystarczające może okazać się samo tylko uwzględnienie na poziomie obliczeniowym tego, co w konstrukcji obiektu jest zastosowane, jak np.

tężników okapowych, wstępnego napięcia krzyżulców stężeń, czy sztywności tarczowej poszycia.

dr inż. Łukasz Supeł, Politechnika Łódzka, Katedra Mechaniki Konstrukcji

Normy

N1. PN-EN 1993-1-1 Eurokod 3 – Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1–1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
N2. ANSI/AISC 360-05 An American National Standard. Specification for Structural Steel Buildings.

Literatura

1. Biegus A., Stalowe budynki halowe, Arkady.
2. Bródka J., Garncarek R., Miłaczewski K., Blachy fałdowe w budownictwie stalowym, Arkady.
3. Kucharczuk W., Labocha S., Hale o konstrukcji stalowej. Poradnik projektanta, Polskie Wydawnictwa Techniczne.
4. Kucharczuk W., Stalowe hale i budynki wielokondygnacyjne, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej.
5. Opracowanie zbiorowe, Budownictwo ogólne. Tom 5. Stalowe konstrukcje budynków projektowanie według Eurokodów z przykładami obliczeń, Arkady.
6. Żmuda J., Konstrukcje wsporcze dźwignic, Wydawnictwa Naukowe PWN.

Artykuł zamieszczony w „Przewodniku Projektanta” wyd. 2/2021

Członkowie Polskiej Izby Inżynierów Budownictwa mogą składać zamówienie na drukowane wydanie „Przewodnika Projektanta” nr 3/2021.

Zachęcamy członków PIIB do wypełnienia formularza zgłoszeniowego zamieszczonego na stronie www.izbudujemy.pl/formularze/przewodnikprojektanta

W kolejnym wydaniu „Przewodnika Projektanta” będziemy poruszać tematy związane z konstrukcjami powłokowymi, odzyskiem ciepła ze ścieków i instalacjami p.poż. Tak jak w każdym numerze będzie artykuł dotyczący BIM, tym razem o wymianie danych w formatach OpenBIM w projektach infrastrukturalnych. W „Przewodniku Projektanta” zamieszczony zostanie także artykuł dotyczący prawa do zaskarżenia pozwolenia na budowę przez organizację ekologiczną.