

PRZEBUDOWY

konstrukcji stalowych

Część 4

sprawdzenie stanów granicznych



dr inż. Jan Gierczak
Katedra Konstrukcji Metalowych
Politechnika Wroclawska

Obecnie na rynku krajowym jest duże zapotrzebowanie na modernizację, remonty lub przebudowy istniejących obiektów kubaturowych. Przy sprawdzaniu stanów granicznych konstrukcji przydatna jest metoda pozwalająca wykorzystać rezerwy plastyczne istniejących układów konstrukcyjnych. W tym celu przydatna jest metoda wykorzystania nie tylko rezerwy plastycznej przekroju, lecz także rezerwy plastycznej dla całego układu konstrukcyjnego.

Ważnym etapem projektowania przebudowy jest sprawdzenie stanów granicznych nośności i użyteczności.

Stan graniczny nośności konstrukcji

Określenie SGN odbywa się poprzez sprawdzenie nośności poszczególnych przekrojów oraz elementów. Sprawdza się, czy we wszystkich przekrojach wartość maksymalnych sił wewnętrznych nie przekracza nośności przekroju od kombinacji obciążeń obliczeniowych. Dla elementów konstrukcyjnych i dla ich układów konstrukcyjnych należy sprawdzić ogólną utratę stateczności przy zadanych imperfekcjach konstrukcji. W analizie konstrukcji należy uwzględnić imperfekcje globalne układów ramowych i stężeń oraz imperfekcje pojedynczych elementów. Przyjmowany w obliczeniach kształt globalnych i lokalnych imperfekcji można określić na podstawie postaci wybočenja sprężystego układu w rozpatrywanej płaszczyźnie. Ustalając kształt imperfekcji, należy uwzględnić wszelkie możliwe postacie i kierunki wybočenja w płaszczyźnie, z płaszczyzny układu, symetryczne i niesymetryczne. W normie PN-EN 1993-1-1:2005-AC:2006 podano wartości obliczeniowe wstępnych imperfekcji łukowych e_0/L w zależności dla krzywych wybočenja (e_0 – wstępna imperfekcji [mm], L – długość elementu wyrażona w [mm]). Wartości te podano w tabeli 1.

Na podstawie tabeli 1 dla poszczególnych elementów możemy dobrać odpowiednią krzywą w zależności od pomierzonych odchy-

łek. Odchyłki te powinny być skorygowane z normami odbiorowymi konstrukcji. Efekty lokalnych imperfekcji łukowych elementów są uwzględnione w formułach sprawdzenia nośności elementów narażonych na wybočenje. Przy szacowaniu nośności elementów należy krzywe wybočenja dobrać zgodnie z ich rzeczywistymi odchyłkami, jednak nie mniejszymi niż wynika to z przyporządkowania krzywych wybočenja dla rodzaju i typu przekroju zgodnie z PN-EN 1993-1-1. W przypadku imperfekcji

Tabela 1. Wartości obliczeniowe wstępnych imperfekcji łukowych e_0/L

Krzywe wybočenja wg PN-EN	Analiza sprężysta e_0/L	Analiza plastyczna e_0/L
a_0	L/350	L/300
a	L/300	L/250
b	L/250	L/200
c	L/200	L/150
d	L/150	L/100

przekraczających wartości dopuszczalne określone w normie odbiorowej należy przeprowadzić osobne analizy uwzględniające rzeczywisty kształt konstrukcji. W tym celu najlepiej wykorzystać programy obliczeniowe oparte na nieliniowej analizie konstrukcji.

Przekroczenie nośności przekrojowej elementu może nie powodować zniszczenia konstrukcji (dotyczy to gatunków stali, które mają wyraźną granicę plastyczności $A_5 > 15\%$). Aby nastąpiło zniszczenie, konstrukcja musi prze-

kształcić się częściowo lub jako całość w łańcuch kinematyczny, tzn. musi powstać maksymalnie $n+1$ przegubów plastycznych (n – stopień statycznej niewyznaczalności rozpatrywanego układu konstrukcyjnego).

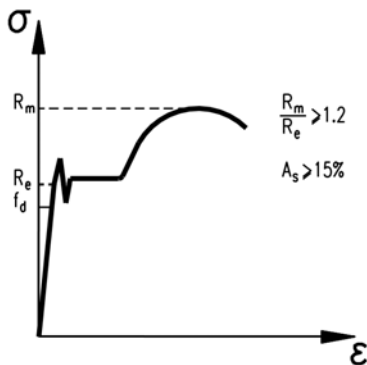
Dodatkowo w konstrukcji powinny być sprawdzone połączenia pomiędzy elementami oraz warunki zmęczenia. W starszych konstrukcjach przeważenie kierowano się zasadą, że wszelkie połączenia są wykonane na nośność łączonych elementów. Obecnie w nowo projektowanych obiektach można spotkać się z rozwiązaniami elementów połączonych między sobą na występujące ekstremalne siły wewnętrzne. Siły wewnętrzne w elemencie mogą być parokrotnie mniejsze od nośności elementu np. w słupkach krat. Zasada ta zwiększa ryzyko powstawania awarii i powinna być prawie zabroniona.

Innym zagadnieniem w ocenie nośności konstrukcji jest wykorzystanie teorii plastyczności. Wykorzystanie rezerwy plastycznej konstrukcji jest pomocne przy projektowaniu, jak i przy ocenie nośności istniejących obiektów. W szczególności w ocenie nośności obiektów przy wykonywaniu ekspertyz uwzględnienie rezerwy plastycznej konstrukcji daje nam niekiedy potrzebny zapas nośności. W konsekwencji powoduje to zmniejszenie nakładu pracy przy ewentualnych remontach i wzmacnianiu istniejącej konstrukcji.

Konstrukcje stalowe możemy wymiarować według trzech metod: metody sprężysto-sprężystej, sprężysto-plastycznej i plastyczno-plastycznej.

W metodzie sprężysto-sprężystej siły wewnętrzne oraz nośność przekroju wyznacza się zgodnie z teorią sprężystości w zakresie sprężystym. W metodzie sprężysto-plastycznej siły wewnętrzne wyznacza się w zakresie sprężystym, natomiast nośności przekroju wyznacza się z wykorzystaniem rezerwy plastycznej, dopuszczając uplastycznienie przekroju. W metodzie plastyczno-plastycznej zarówno siły wewnętrzne, jak i nośności poszczególnych przekrojów wyznacza się, stosując teorie plastyczności. Wymiarowanie konstrukcji według teorii plastyczności dopuszczają normy PN-EN i PN. Normy te dopuszczają projektowanie metodą plastyczno-plastyczną, gdy konstrukcja, obciążenie itp. spełniają określone warunki. Idea projektowania konstrukcji w zakresie plastycznym w poszczególnych normach jest identyczna, a różnice w wymiarowaniu wynikają z innego podejścia do szacowania bezpieczeństwa i niezawodności konstrukcji. Norma PN i PN-EN dopuszcza projektowanie konstrukcji wg teorii plastyczności, gdy spełnione są następujące warunki niezbędne do plastycznej redystrybucji sił wewnętrznych:

1. stal, z jakiej zaprojektowana jest konstrukcja, charakteryzuje się wydłużalnością $A_5 \geq 15\%$ i stopniem wzmocnienia $R_m/R_e \geq 1,2$ (obecnie f_u/f_y) (rys. 1),



Rys. 1. Wykres naprężenie – odkształcenie

2. każdy element, w którym mogą powstać przeguby plastyczne, jest homogeniczny, pełnościenny i ma stały, co najmniej monosymetryczny przekrój klasy 1,
3. obciążenie przechodzi przez środek ciężkości i środek ścinania, nie powodując skręcania,
4. elementy zginane względem osi największej bezwładności przekroju są zabezpieczone przed zwichrzeniem oraz w miejscach potencjalnych przegubów plastycznych elementy są zabezpieczone przed przemieszczaniem z płaszczyzny układu,
5. w miejscu działania obciążeń skupionych, w których mogą powstać przeguby plastyczne, elementy są usztywnione żebrami poprzecznymi,
6. połączenia zginane (węzły sztywne) w miejscach lub w bezpośrednim sąsiedztwie przegubów plastycznych mają nośność nie mniejszą niż nośność przekroju elementów łączonych powiększona o 20%.

Pierwszy warunek jest spełniony dla typowych stali używanych w budownictwie, tj. dla stali S235, S355 (dawnych oznaczeń St3S, I8G2, czy też niemieckiej stali St52-3). Warunek drugi i trzeci spełnione są dla większości elementów dwuteowych gorącowniczo (np. HEB, HEA). Należy tutaj nadmienić, że spoiny powinny być rozmieszczone symetrycznie. Nie powinno się stosować spoin jednostronnych łączących środkami z pasem. Czwarty warunek powinien być uzupełniony o następujące zdanie: *Każdy element i każda grupa elementów powinny być zabezpieczone przed globalną utratą stateczności.* Ten warunek jest oczywisty, gdyż konstrukcja niezabezpieczona przed utratą stateczności globalnej ulegnie zniszczeniu przed powstaniem przegubów plastycznych. Warunek ostatni wymaga komentarza. Połączenia sztywne w konstrukcjach są przeważnie ze śrub sprężających o znacznej wytrzymałości na rozciąganie. Śruby te wykonane są ze stali, które nie spełniają warunku 1, tzn. nie mają wyraźnej granicy plastyczności ($A_5 \leq 15\%$). Panujący w połączeniu moment plastyczny nie gwarantuje powstania przegubu plastycznego z powodu braku swobody obrotu węzła. Z tego też względu PN-EN proponuje przyjmować nośność połączenia o 20% większą od momentu plastycznego, jaki może przenieść uplastyczniony przekrój łączonych elementów. Wtedy to przegub plastyczny powstaje na elemencie nieskończenie blisko połączenia. Dla elementów spawanych warunek podany w normie jest wystarczający, pod warunkiem przeniesienia momentu plastycznego przez spoiny. Przy obciążeniu granicznym powstają trwałe odkształcenia w konstrukcji, dlatego też konstrukcja powinna być obciążona statycznie.

Dla przekroju prostokątnego współczynnik rezerwy plastycznej przy zginaniu wynosi 1,5, zatem rzeczywisty wzrost nośności przekroju w stanie plastycznym wynosi 50%. Dla elementów dwuteowych (IPE, HEA, HEB itd.) współczynnik ten waha się od 1,12-1,14. Następną korzyścią wynikającą ze stosowania teorii plastyczności jest uwzględnienie współczynnika rezerwy plastycznej układu prętowego α_u wynikającego z plastycznej redystrybucji sił wewnętrznych. Współczynnik rezerwy plastycznej układu prętowego jest stosunkiem wartości obciążenia wyznaczonego z warunku równowagi granicznej, przy której układ staje się geometrycznie zmienny do wartości obciążenia, przy którym tworzy się pierwszy uogólniony przegub plastyczny. Współczynnik rezerwy plastycznej układu prętowego α_u należy przyjmować do szacowania konstrukcji nie większy niż średni ważony współczynnik obciążenia.

Teorii plastyczności nie powinno się stosować dla belek podsuwnicowych, hybrydowych, ażurowych, elementów cienkościennych, elementów narażonych na szkody górnicze lub obciążonych sejsmicznie.

Sprawdzenie stanu granicznego użytkownika

Stan graniczny użytkownika (SGU) powinien być spełniony dla obiektów przebudowanych w świetle PN i PN-EN. W normach przeważnie podane są dopuszczalne przemieszczenia się konstrukcji dla ram poprzecznych, belek czy też słupów. W większości wypadków spełnienie SGU możemy spełnić dla konstrukcji, zmniejszając ich ugięcia i przemieszczenia poprzez zwiększenie sztywności poszczególnych prętów czy też zmianę schematów statycznych, np. ze statycznie wyznaczalnych na statycznie niewyznaczalne. Innym sposobem jest redukcja obciążeń stałych poprzez usunięcie lub zamianę istniejących warstw. Przy braku możliwości redukcji przemieszczeń konstrukcji można dopuścić przekroczenie normowych przemieszczeń pod warunkiem przeprowadzenia pełnej analizy dynamicznej konstrukcji. Dla większości stropów częstotliwość drgań własnych nie powinna być mniejsza niż 5 Hz. Warunek ten dla obiektów sportowych jest bardziej rygorystyczny i wynosi minimum 8 Hz. Natomiast dla stropów przeznaczonych na potrzeby zespołów tańecznych wynosi minimum 9 Hz. Dla sal operacyjnych, w których umieszczona jest precyzyjna aparatura, częstotliwość wymagana jest na poziomie minimum 12 Hz. Z tych względów zdaje się, że przebudowa z punktu technicznego i ekonomicznego jest nieracjonalna pomimo spełnienia SGN.

Zdarza się, że z punktu widzenia technicznego i ekonomicznego przebudowa jest nieracjonalna pomimo spełnienia stanu granicznego nośności.

Obecnie istnieją proste metody określania częstości drgań stropu obiektu z wykorzystaniem mostka pomiarowego do badań dynamicznych, czujników indukcyjnych przyspieszeń typu B12/200, komputera przenośnego oraz oprogramowania. W hali (rys. 2) o łącznej powierzchni ponad 100 tys. m² wykonywano pomiary przyspieszeń pionowych drgań stropów w wybranych miejscach. Jako wymuszenie drgań badanych stropów hal zastosowano przejazd wózków widłowych wzdłuż i w poprzek hali oraz podskoki członków zespołu badawczego (2 osoby o łącznej masie około 150 kg). Obciążenia wymuszone były wykonane na stropie w odległości minimum 10 m od aparatury pomiarowej. Pomiary prowadzono z częstotliwością próbkowania 200 Hz. Czas pojedynczej sesji wynosił 20 sekund. Przy pomiarze drgań, przyspieszeń i częstotliwości drgań pionowych stropu dla obciążenia wózkiem widłowym wartość ta była nie do uchwycenia z powodu wysokiej amplitudy drgań stropu, która była poza zasięgiem aparatury pomiarowej. Drgania stropu były przekroczone i wózki widłowe nie mogły być używane na stropie. Natomiast drga-

nia wywołane przez zespół badawczy były rejestrowane i przedstawiono je na rys. 3 i 4, przy nieobciążonym stropie. Na rys. 3 pomierzona wartość maksymalna przyspieszeń wynosiła 1,48 m/s². Natomiast okres drgań przy tym pomiarze drgań wynosił 5,6Hz. Należy tutaj nadmienić, że strop miał być obciążony maszynami i urządzeniami technologicznymi. Dla stropu obciążonego urządzeniami technologicznymi częstotliwość drgań stropu jest mniejsza od 4 Hz. Strop nie spełnia warunku sztywności. Badania można było zweryfikować obliczeniami własnymi, przy założonych schematach obliczeniowych. Uzyskano zgodność wartości pomierzonych z wartościami obliczeniowymi nieprzekraczającą 10%. Pozwoliło to przeprowadzić symulacje komputerowe stropu pod pełnym obciążeniem

technologicznym oraz obciążeniem stałym od maszyn produkcyjnych.

Przytoczone badania pozwalają określić, sprawdzić i ustalić jednoznacznie parametry konieczne przy obliczaniu częstotliwości drgań stropu. Do tych parametrów można zaliczyć ciężar stropu i schematy statyczne, jakie zostały zrealizowane na obiekcie. Wszelkie rozbieżności otrzymanych wyników pomiarowych z obliczeniami należy korygować oraz odnieść się do obliczeń numerycznych. Badania te zaliczane są do badań nieniszczących i bardzo przydatnych w celu weryfikacji poczynionych założeń.

W innym aspekcie należy rozpatrywać przebudowę konstrukcji pod obciążenia zmęczeniowe. Wymagana jest pełna analiza zmęczenia konstrukcji z jej korbami, połączeniami

oraz historią obciążenia konstrukcji. Nośność konstrukcji ze względu na zmęczenie materiału należy sprawdzić w przypadku obciążeń wielokrotnie zmiennych. W normach PN i PN-EN podane są krzywe i kategorie zmęczeniowe dla elementów konstrukcyjnych eksploatowanych w przeciętnych warunkach eksploatacyjnych, w temperaturze do 150°C, i spełniających w stanie sprężystym następujące warunki:

$$\begin{aligned} \bullet \max \Delta \sigma &= \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \leq 1,5 f_y \\ \bullet \max \Delta \tau &= \tau_{\max} - \tau_{\min} \leq 0,87 f_y \end{aligned}$$

gdzie σ_{\max} , σ_{\min} – maksymalne i minimalne naprężenie normalne w rozpatrywanym karbie, τ_{\max} , τ_{\min} – maksymalne i minimalne naprężenia styczne w rozpatrywanym karbie, f_y – granica plastyczności stali.

Do wyznaczenia naprężeń w stanie sprężystym należy przyjmować wartości charakterystyczne ze współczynnikiem dynamicznym. W konstrukcjach obciążonych zmęczeniowo nie wolno dopuszczać do uplastycznienia przekroju, gdyż zachodzi zjawisko zmęczenia plastycznego. W konstrukcjach wzmacnianych i obciążonych zmęczeniowo nie powinno się stosować dodatkowego spawania. Wszystkie połączenia należy wykonywać na śruby sprężające lub pasowane.

Pełny wykaz bibliografii i norm zamieszczono w nr 4 w części 1 cyklu. ■

W kolejnej części cyklu: Wzmacnianie istniejącej konstrukcji stalowej

Abstract.

Reconstructions of steel structures. The problem of reconstruction of existing steel buildings will be presented in an article series, which will describe aspects and issues that are important from the point of view of a correctly and rationally led building reconstruction, according to the currently binding law and to the author's personal experience.

Bibliografia

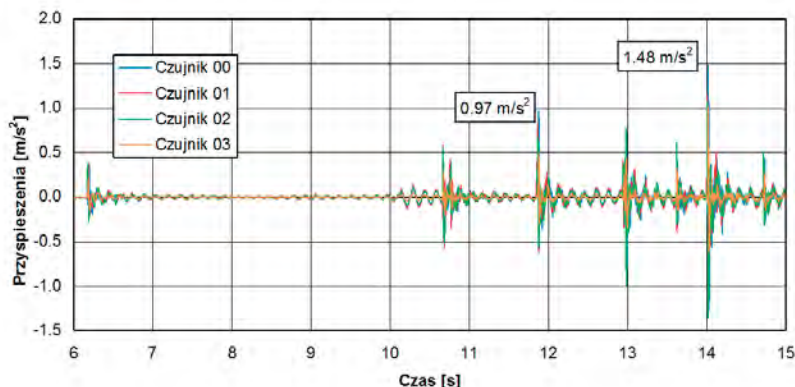
- [1] Kowalski D., *Techniki badania właściwości stali*. XIV Konferencja Naukowo-Techniczna Warsztat Pracy Rzecznicy Budowlanego Kielce-Cedzyna 2016.
- [2] Gosowski B., Kubica E., *Badania Laboratoryjne konstrukcji metalowych*, Oficyna Wydawnicza politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2012.
- [3] Gosowski B., Organek P., *Wykorzystanie nieniszczących pomiarów twardości do oceny parametrów wytrzymałościowych stali z początku XX wieku*. „Inżynieria i Budownictwo” 2/2016.

O autorze

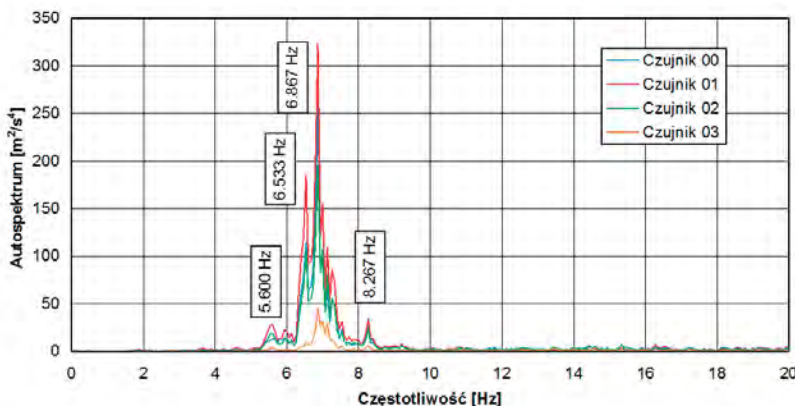
Dr inż. Jan Gierczak jest czynnym projektantem, rzeczoznawcą budowlanym, konsultantem wielu firm budowlanych o specjalności konstrukcji stalowych. Brał udział w realizacji licznych obiektów przemysłowych. Jest autorem wielu ekspertyz dotyczących projektowania i wykonawstwa konstrukcji stalowych, a także licznych projektów konstrukcji szklanych z elementami stalowymi (jak np. stalowe kraty linowe), wykonanych ze szkła hartowanego i klejonego. Jest adiunktem w Zakładzie Konstrukcji Metalowych na Politechnice Wrocławskiej.



Rys. 2. Badania parametrów dynamicznych stropu hali przemysłowej obciążonej wózkami widłowymi. Widoczne są dwa czujniki indukcyjne



Rys. 3. Przebieg w czasie pionowych drgań stropu hali przy wymuszeniu podskokami zespołu badawczego (sesja obejmująca maksymalne amplitudy przyspieszeń)



Rys. 4. Uśrednione autospektra pionowych drgań stropu hali nr 1 dla wszystkich zrealizowanych sesji pomiarowych