ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1995

Seria: BUDOWNICTWO z.81 Nr kol.1292

Ireneusz GROCHOWSKI, Walter WUWER

WZMACNIANIE STALOWYCH DŹWIGARÓW KRATOWYCH

Streszczenie. Na podstawie literatury przedmiotu i własnych doświadczeń przedstawiono problematykę zwiazaną z zagrożeniem nośności i wzmacnianiem stalowych dźwigarów kratowych. Omówiono między innymi przyczyny i niektóre oznaki świadczące o możliwości wystąpienia awarii takich konstrukcji (w szczególności wiązarów dachowych). Na końcu przytoczono przykłady zrealizowanych wzmocnień typowych wiązarów dachowych.

STRENGTHENING OF STEEL LATTICE GIRDERS

Summary. Basing on the literature and own experience, the work presents problems concerning load capicity hazards and strengthening of steel lattice girders. The work discusses among others the reasons and some symptoms indicating a possibility of failures that such constructions may be subjected to (in particular roof trusses). Finnally, the examples of executed strengthening procedures of typical roof trusses were presented.

VERSTÄRKUNG VON STAHLGITTERTRÄGERN

Zusammenfassung. Anhand der Fachliteratur und eigener Erfahrung wurde die mit Tragkraft - und Verstärkungsgefährelung der Stahlgitterträger verbundene Problematik dargestellt. Unter anderem wurden die Gründe und einige Anzeichen besprochen, die davon zeugen können, daß Havarien solcher Konstruktionen auftreten können (ins besondere der Dachbinder). Zum Schluß wurden Beispiele für so ausgeführte Verstärkungen typischer Dachbinder gezeigt.

1. PRZEGLĄD PROBLEMATYKI DOTYCZĄCEJ ZAGROŻENIA NOŚNOŚCI I WZMACNIANIA STALOWYCH DŹWIGARÓW KRATOWYCH

Stalowe dźwigary kratowe znajdują szerokie zastosowanie zarówno w budownictwie przemysłowym, jak też w powszechnym i mostownictwie. Podlegają one wzmacnianiu przy przebudowie lub też kiedy występuje zagrożenie awarią, a w szczególności w przypadkach [1]:

- występowania wad i usterek konstrukcyjnych będących następstwem błędów i uchybień projektowania, wykonania i montażu;

- zmiany warunków użytkowania, fizycznego zużycia oraz uszkodzeń powstałych wskutek nieprawidłowej eksploatacji i zdarzeń losowych;
- utraty zdolności użytkowej w następstwie oddziaływań dynamicznych, wibracyjnych i termicznych.

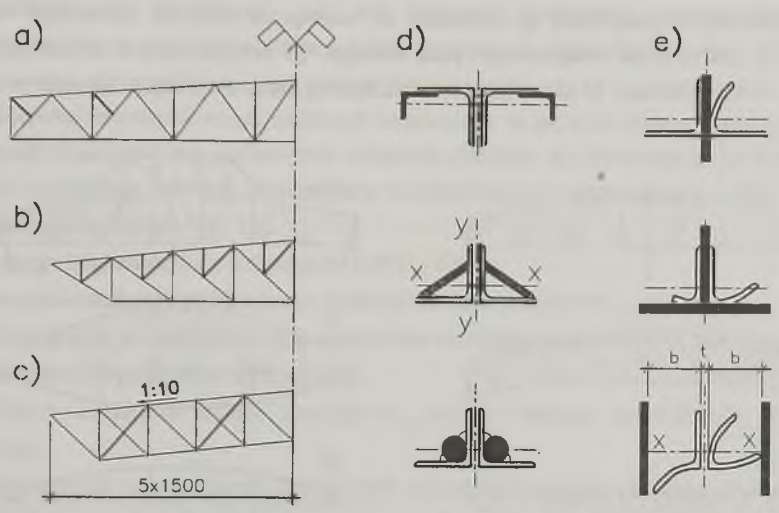
O zagrożeniu nośności stalowych wiązarów dachowych można między innymi już wnioskować po stwierdzeniu występowania ewidentnych objawów rodzaju: pęknięcie blachy węzłowej, wyraźne wygięcie osi pręta ściskanego, miejscowe uszkodzenie lub deformacja półki kształtownika walcowanego lub spawanego, nieprzecinanie się w węźle osi prętów składowych, poziome przemieszczenie osi pasa górnego względem dolnego, niewęzłowe obciążenia [2].

Racjonalne opracowanie projektu wzmocnienia dźwigara obciążonego wymaga od projektanta posiadania nie tylko odpowiedniego przygotowania teoretycznego, lecz również doświadczenia zawodowego, bowiem, jak wykazuje praktyka, każdy przypadek wzmocnienia konstrukcji, nawet podobnych, musi być traktowany jako niezależne, niepowtarzalne zadanie.

Dźwigary stalowe zaliczają się do konstrukcji łatwo poddających się remontom i wzmacnianiu, zwłaszcza w przypadku stosowania spawania jako sposobu łączenia materiałów. Spawanie upraszcza w porównaniu z innymi sposobami łączenia prace przygotowawcze, umożliwia zachowanie nieosłabionych przekrojów elementów wzmacnianych oraz rozszerza możliwości wyboru kształtu wzmocnień i ich usytuowania przestrzennego.

Klasycznym przykładem możliwości zwiększenia zdolności użytkowej stalowych dźwigarów kratowych na drodze wzmacniania i przebudowy może być tak odpowiedzialny obiekt inżynierski, jak jednoprzęsłowy most kolejowy o długości 120 m nad doliną Trisanna w Tyrolu, który w okresie 80-letniej eksploatacji kilkakrotnie podlegał szeroko rozumianej przebudowie wskutek zwiększających się z czasem obciążeń użytkowych, a polegającej na wzmocnieniach prętów głównych, dołączeniach dodatkowych pasów dolnych [3].

Do podstawowych zabiegów stosowanych przy wzmacnianiu dźwigarów kratowych zaliczają się takie, jak:
- wzmacnianie (zwiększanie) przekrojów prętów,
- wzmacnianie połączeń prętów,
- wbudowywanie nowych prętów,
- zmiana schematu statycznego konstrukcji.



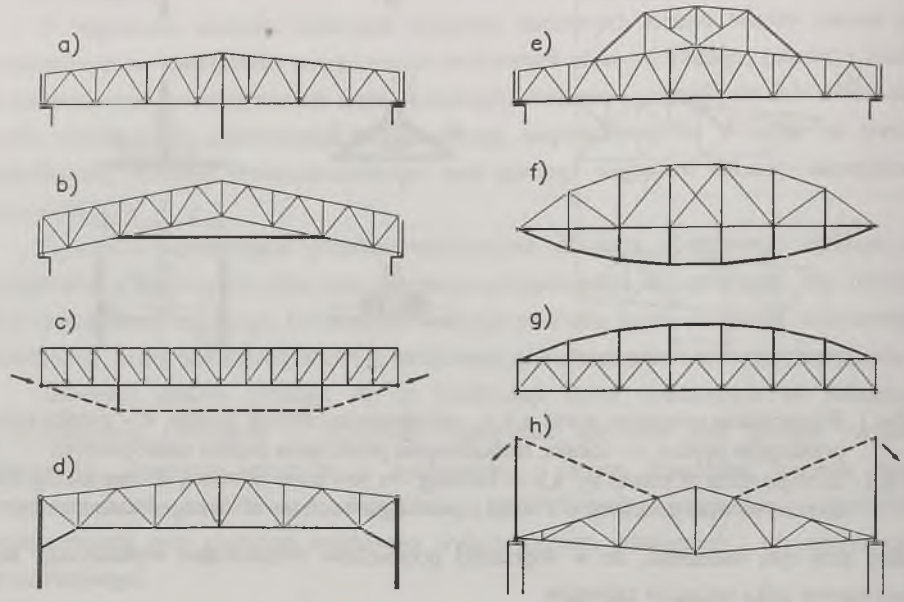
Rys.1. Wzmacnianie wiązarów przez: a,b,c - wbudowanie nowych prętów, d - zwiększenie przekrojów prętów, e - lokalne rozbudowanie przekrojów prętów uszkodzonych
Fig.1. Strengthening of trusses by: a,b,c - building - in new truss mémbers, d - expanding the sections of truss members, e - local expanding of sections of damaged truss members

Należy przy tym nadmienić, że w większości przypadków wzmacniania wykorzystuje się równocześnie kilka rodzajów zabiegów.

Na rys.1a i b zilustrowano przykłady wbudowywania w dźwigary - wiązary dachowe nowych prętów. W pierwszym przypadku pręty dodatkowe zmniejszają długości wyboczeniowe krzyżulców ściskanych, a w drugim (drugorzędne podparcie) nie tylko zmniejszają dwukrotnie długości wyboczeniowe pasa ściskanego, lecz także długości przęsłowe, co wpływa istotnie na zwiększenie nośności pręta międzywęzłowo zginanego. Z kolei krzyżulce dodatkowe (rys.1c) odciążają krzyżulce i słupki - pręty pierwotnego skratowania wiązara. Na rys.1d pokazano wybrane przykłady wzmocnień prętów wiązarów, cechujących się tradycyjnym ukształtowaniem przekrojów poprzecznych, gdzie istotne znaczenie odgrywa warunek współosiowego przyłączania elementów wzmacniających. Na rys.1e przytoczono przykłady wzmacniania przekrojów lokalnie uszkodzonych prętów złożonych z podwójnych kątowników (środek ciężkości przekroju wzmocnienia powinien pokrywać się ze środkiem ciężkości pręta), chętnie stosowanych w praktyce z pominięciem dokładniejszej analizy redukcji nośności - następstwa miejscowych wygięć półek. [2].

Z kolei na rys.2 zaprezentowano sposoby wzmacniania dźwigarów kratowych za pomocą zmieniania schematu statycznego przez: a) wprowadzenie podpory dodatkowej, b) wbudowanie dodatkowego pręta-ściągu, c) zastosowanie cięgna wstępnie napiętego,

d) utwierdzenie na podporach, e) włączenie do współpracy kratowej konstrukcji świetlni wiązara, f) przyłączenie dodatkowego pasa dolnego, g) zabudowanie dodatkowego pasa górnego - łuku wiotkiego, h) ukształtowanie wieszarowej konstrukcji wspomagającej .



Rys.2. Wzmacnianie dźwigarów kratowych za pomocą zmiany schematu statycznego
Fig.2. Strengthening of lattice girders by changing the static design

Przed wyborem koncepcji wzmocnienia należy zawsze sprawdzić, czy dana konstrukcja nie ma nieujawnionych zapasów nośności, mogących wynikać np. z:

- uściślenia wielkości obciążeń obliczeniowych,
- uwzględnienia możliwości współpracy przestrzennej,
- dopuszczenia odkształceń plastycznych w ustrojach statycznie niewyznaczalnych.

Także dokładna, obliczeniowa ocena nośności dźwigarów obarczonych defektami rodzaju: wygięcia osi prętów, wygięcia półek kształtowników lub występowanie otworów nie przewidzianych w projekcie oraz naderwań - pozwala w wielu wypadkach uniknąć konieczności ich wzmacniania. Analizę wytrzymałościową należy wykonywać na podstawie współczesnych metod obliczeń i wg aktualnych norm projektowania, po określeniu gatunku stali w konstrukcji drogą badań laboratoryjnych, [3], [4].

Wykonanie projektu wzmocnienia dźwigara stalowego jest zadaniem znacznie trudniejszym niż zaprojektowanie nowego, bowiem w pierwszym przypadku należy dodatkowo

uwzględniać takie okoliczności, jak: stan wytężenia konstrukcji, występowanie różnic materiałowych, ograniczenia konstrukcyjno-gabarytowe, warunki lokalne, możliwości wykonawcze wzmocnień, a w szczególności połączeń itp.

Szczególną ostrożność należy zachować wzmacniając za pomocą spawania dźwigary, które podlegały długotrwałemu użytkowaniu, a których elementy składowe mogą być wykonane z żelaza zgrzewnego lub stali zlewnej, lecz o zmienionych właściwościach technologiczno-mechanicznych wskutek [3], [5]:

- długiego nagrzewania do temperatury 100°C - 200°C,
- zmęczenia materiału poddawanego działaniu obciążeń zmiennych ,
- zmiany znaku sił wewnętrznych w następstwie wcześniejszej przebudowy lub wzmacniania,
- zdarzeń losowych (pożar, wybuch itp.).

Dla takich konstrukcji należy bezwzględnie wykonać badania sprawdzające spawalność materiału.

Wzmocnienia prętów osiowo obciążonych elementów składowych dźwigarów kratowych można obliczać:

- zakładając pracę materiału w zakresie sprężystym,
- wykorzystując plastyczną rezerwę nośności, [5], [6], [7],
- sprężając pręty rozciągane.

Dopuszczenie w stali pozasprężystych stanów odkształceń jest celowe szczególnie w przypadku występowania wysokiego poziomu naprężeń w prętach wzmacnianych.

O ile wzmacnianie bezpośrednie pręta rozciąganego jest zawsze związane ze zwiększeniem jego przekroju poprzecznego, to nośność pręta ściskanego można efektywnie zwiększyć także przez zmniejszenie długości wyboczeniowej (por. rys.1a i b). Zwiększaniu przekroju pręta ściskanego powinien towarzyszyć wzrost promienia bezwładności przekroju wzmocnionego, a tym samym zmniejszenie smukłości.

2. NIEKTÓRE BŁĘDY ORAZ NIEPRAWIDŁOWOŚCI WIĄZARÓW KRATOWYCH

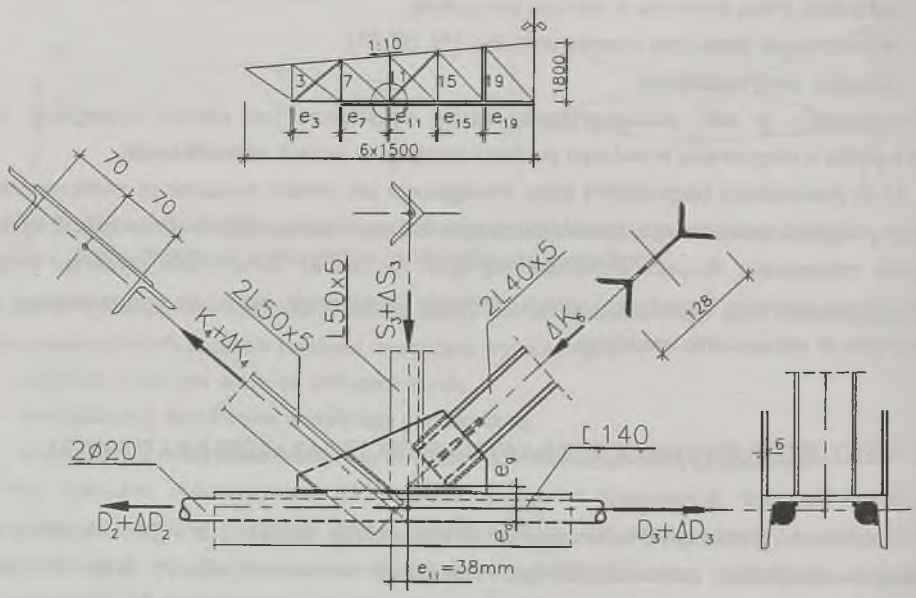
O złożoności problematyki odnoszącej się do wzmacniania stalowych dźwigarów kratowych mogą świadczyć niżej przytoczone uwagi, wynikające z doświadczeń nabytych przez autorów przy projektowaniu wzmocnień tzw. typowych, skonstruowanych wg KB1-31.6.1/22/-76, a zagrożonych awariami wiązarów dachowych kilkunastu obiektów budowlanych, przede wszystkim sal gimnastycznych. I tak, poza istotnymi błędami obliczeniowo-konstrukcyjnymi danych wiązarów, do awaryjnego zagrożenia przyczyniły się także (wskutek - oględnie

mówiąc - niskiej kultury wykonania warsztatowego oraz montażu i budowy) takie nieprawidłowości i zaniedbania, [8], jak:

- użycie na pasy materiału o gorszych właściwościach, niż przewidywał projekt,
- zabudowanie prętów skratowania wewnętrznego o mniejszych przekrojach (np. zamiast kątowników 50×6 zastosowano 50×5),
- zamiana termiczno-wilgotnościowych warstw izolacji dachu (zwiększenie masy),
- ułożenie na dachu gładzi cementowo-piaskowej nadmiernej grubości,
- miejscowa zamiana typu żelbetowych płyt bezpłatwiowego pokrycia dachu na węższe (międzywęzłowe zginanie górnych pasów wiązarów).

Ponadto już w toku wykonywania prac wzmacniających, wskutek braku właściwego nadzoru, występowały również sytuacje stwarzające niebezpieczeństwo utraty nośności przez konstrukcje wzmacniane.

3. PRZYKŁADY WZMOCNIEŃ TYPOWYCH WIĄZARÓW DACHOWYCH



Rys.3. Szczegół wzmocnienia wiązara W-18-01
Fig.3. Detail of strengthening of the W-18-01 truss

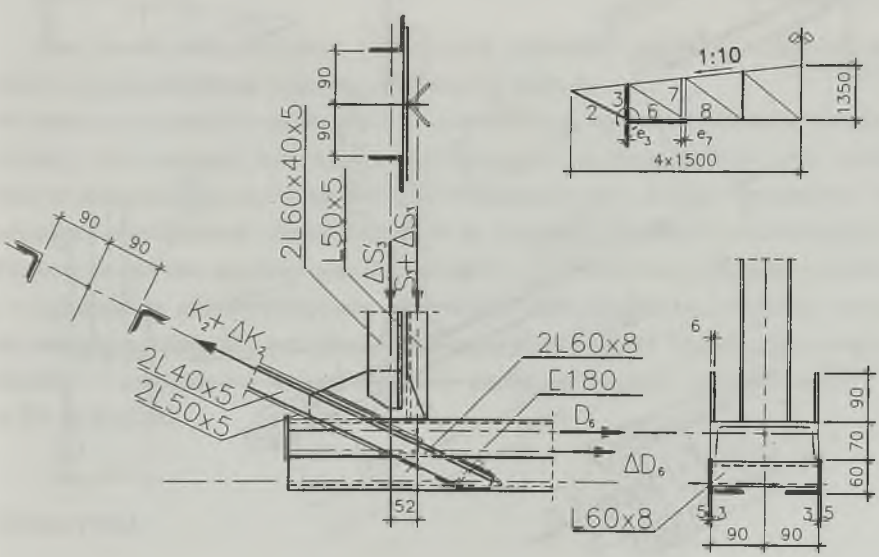
Na rys.3 pokazano szczegół wzmocnienia zabudowanego wiązara typu W-18-01 dachu auli szkolnej (pas dolny i górny - pojedyncze ceowniki, krzyżulce - podwójne kątowniki, słupki -

pojedyncze kątowniki), w którym oprócz takich błędów, jak np. słabe przekroje i ich połączenia spawane prętów występowały duże mimośrody połączeń tychże prętów w węzłach pasa dolnego (e_3 = -50.4 mm, e_7 = +28.2 mm, e_{11} = +38.0 mm, e_{15} = +13.2 mm, e_{19} = +12.1 mm).

Wzmocnienie polegało przede wszystkim na wbudowaniu 4 krzyżulców dodatkowych wraz z blachami węzłowymi, przez co uzyskano następujące korzyści:

- znaczne odciążenie 4 krzyżulców i 8 słupków z ich połączeniami,
- możliwość wzmocnienia wadliwych połączeń krzyżulców za pośrednictwem podłużnych spoin pachwinowych wyprowadzonych na dodatkowe blachy węzłowe,
- częściowe zniwelowanie (po wprowadzeniu nowych krzyżulców z zamierzonymi mimośrodami e_g i wystąpieniu przy pełnym obciążeniu przyrostów sił ΔK, ΔS oraz ΔD) niekorzystnego wpływu początkowych mimośrodów e_d połączeń prętów skratowania wewnętrznego, pociągających za sobą zginanie prętów zbiegających się w rozpatrywanym węźle,
- powstanie dodatkowej, chociaż obliczeniowo nie uwzględnionej rezerwy nośności w następstwie przesztywnienia konstrukcji.

Ponadto wzmocniono pas dolny przez wprowadzenie dodatkowego przekroju 2ϕ20 połączonego z nim współosiowo, i dwa słupki środkowe - podobnie jak na rys.4.

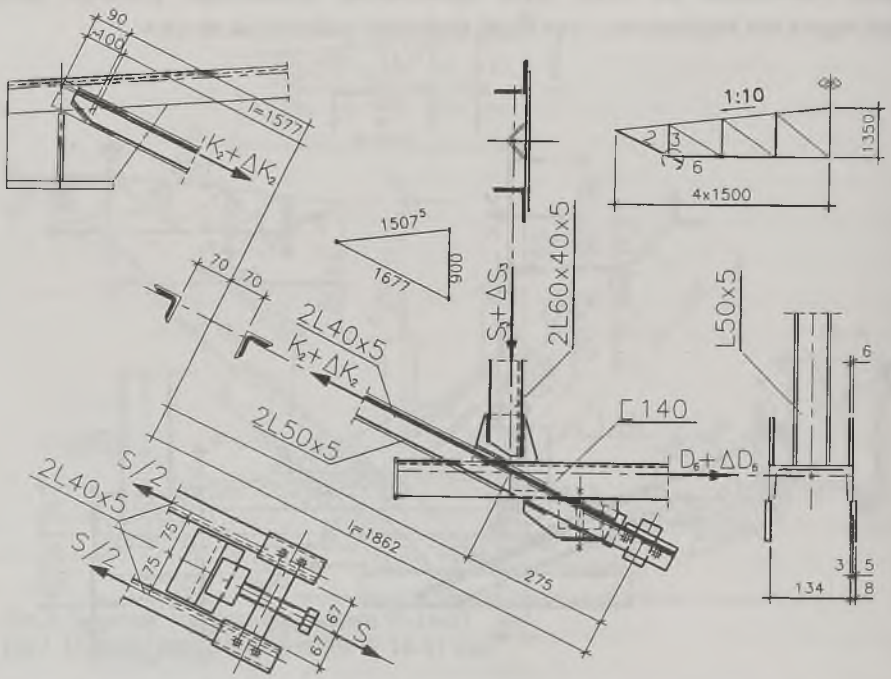


Rys.4. Wzmocnienie krzyżulca, pasa i słupka wiązara W-12-01
Fig.4. Strengthening of the cross brace, flange and post of the W-12-01 truss

Na rys.4 przedstawiono sposób wzmocnienia wiązara dachowego typu W-12-01 sali gimnastycznej przez: zabudowanie dodatkowych słupków obok istniejących, zwiększenie przekrojów krzyżulców podporowych, a także pasa dolnego w skrajnych przedziałach. Zakres wzmocnień wynikał z rozległości i stopnia przekroczenia wytrzymałości w elementach składowych wiązara. I tak np. przekroczenie wytrzymałości na krawędzi niewzmocnionego przekroju pasa dolnego (ustalony przy założeniu sprężystej pracy materiału) sięgałoby ok. 47% przy uwzględnieniu działania siły osiowej i momentu zginającego (efektu niewspółśrodkowych połączeń prętów w węzłach); wytrzymałość w słupkach skrajnych byłaby natomiast przekroczona aż o ok. 51%.

Rozwiązanie to pozwoliło na:

- wzmocnienie przekrojów i zwiększenie nośności połączeń w węzłach krzyżulców podporowych,
- odciążenie słupków istniejących, cechujących się nieprawidłowymi połączeniami z pasami,
- znaczące zmniejszenie niekorzystnego wpływu niewspółśrodkowych połączeń w węzłach prętów skratowania,



Rys.5. Wzmocnienie krzyżulca i słupka wiązara W-12-01
Fig.5. Strengthening of the cross brace and post of the W-12-01 truss

- znaczne zwiększenie wytrzymałości pasa na zginanie z równoczesną redukcją dodatkowych momentów zginających krzyżulce.

Z kolei na rys.5 pokazano wzmocnienie wiązara tego samego typu w innym obiekcie sportowym, lecz w tym przypadku z zastosowaniem sprężania krzyżulców podporowych oraz wbudowaniem słupków dodatkowych. Konieczność sprężania krzyżulców wynikała z faktu występowania w nich naprężeń na poziomie wytrzymałości obliczeniowej już przy działaniu obciążeń stałych. Sprężanie realizowano za pomocą kontrolowanego momentu dokręcania śruby M24 przy częściowo odciążonych wiązarach. Charakterystyczną wartość siły sprężającej S ustalono z warunku wykorzystania nośności przekroju krzyżulca wzmacnianego [7].

Realizacja wzmocnień wiązarów wymagała w niektórych przypadkach częściowego lub nawet niekiedy całkowitego ich odciążania. Odciążanie wiązarów, przebiegające w sposób kontrolowany, odbywało się przez podklinowywanie odpowiednio stężonych słupów drewnianej konstrukcji tymczasowej, podpierającej elementy pokrycia dachowego we wszystkich węzłach górnych pasów wiązarów. Często też zdarzało się, że każdy spośród kilku wiązarów danego przekrycia dachowego wymagał oddzielnego projektu wzmocnienia.

4. UWAGI KOŃCOWE

Przy ocenie stanu wytężenia przeciążonych elementów wiązarów i projektowaniu stosownych wzmocnień stal traktowano jako materiał sprężysty.

W pierwszym przypadku uzasadnione to było znacznym na ogół przekroczeniem warunków nośności, które nie mogło być "zniwelowane" przez rezerwę plastyczną, lub wręcz brakiem rezerwy plastycznej (jak np. w pręcie osiowo rozciąganym), a w drugim - racjonalnymi pod względem konstrukcyjnym, uzyskiwanymi tą drogą, wymiarami elementów wzmacniających.

Niemniej celowe jest określanie nośności elementów i konstrukcji oraz obliczanie wzmocnień z uwzględnieniem rezerwy plastycznej; prowadzić to może bowiem do zmnejszenia zakresu prac naprawczych i bardziej oszczędnych rozwiązań konstrukcyjnych. Wystarczające podstawy formalne i merytoryczne do wykorzystania plastycznej rezerwy nośności zawarte są w PN-90/B-03200.

LITERATURA

[1] Grochowski I.:Wzmacnianie stalowych wiązarów dachowych. VII Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „ Konstrukcje metalowe ", Referaty, t.3, Gdańsk 1989.

[2] Birjulew W. W. i inni: Projektirowanije mietalliczeskich konstrukcij. Strojizdat, Leningrad 1990.
[3] Spal L.: Przebudowa konstrukcji stalowych. Arkady, Warszawa 1973.
[4] Ziółko J.: Ocena przydatności konstrukcji stalowych do modernizacji. Inż. i Bud., nr 12/1988.
[5] Łaszczenko M. N.: Powyszenije nadieżnosti mietalliczeskich konstrukcij zdanij i sooruženij pri riekonstrukcii. Strojizdat, Leningrad 1987.
[6] Chiło E. R., Popowicz B. S.: Usilenije stroitielnych konstrukcij. „Wiszcza szkoła", Lwów 1985.
[7] Grochowski I.: Wzmacnianie prętów stalowych obciążonych osiowo. Inż. i Bud., nr 10/90.
[8] Grochowski I., Wuwer W.: O przyczynach zagrożenia nośności stalowej konstrukcji przekrycia sal gimnastycznych. Prz. Bud., nr 5/88.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Jerzy Niewiadomski

Wpłynęło do Redakcji 30.06.1995 r.

Abstract

Steel lattice girders are subjected to strengthening in a reconstruction process, or when there exist failure hazards. There are following basic procedures used in the process of their strengthening: expanding the sections of truss members (Fig.1d), strengthening of member joints, building - in new, additional truss members (Fig.1a,b,c) and changing the static design of the construction (Fig.2); most often, a few kinds of procedures are applied simultaneously. Strengthening of axially loaded truss members of lattice girders may be calculated: assuming the work of material within elastic range, taking advantage of plastic loading reserve, or compressing truss members subjected to tension.

The authors of the paper worked out strengthening designs for roof structures of a dozen or so building structures endangered by failure hazards which applies mainly to gymnastic halls. Pre-failure condition of these structures was caused by calculation and constructional errors of the projects of typical trusses, and also by inadmissible deviations from proper maintenance of costructional principles in the workshop and at the site ,[8]. In the presented cases, strengthening of trusses consisted in: building - in new cross braces with pre-considered eccentrics (Fig.3), expanding (Fig.4) or compressing (Fig.5) the sections of supporting cross braces, building - in new, additional posts, next to the existing ones (Fig.4 and 5) and expanding the sections of bottom flanges (Fig.3 and 4). In some cases the execution of strengthening procedure necessitated a partial and exceptionally even complete lightening of trusses.