

Artur BLUM, Dorota CHODOROWSKA

WPLYW SIŁ SPRĘŻANIA TECHNOLOGICZNEGO NA WYTRZYMAŁOŚĆ STALOWYCH DŹWIGARÓW BLACHOWNICOWYCH

Streszczenie. W referacie przedstawiono wpływ sprężania technologicznego na wytrzymałość stalowych dźwigarów blachownicowych. Na podstawie otrzymanych na drodze eksperymentalnej wartości sił i momentów sprężających dokonano znormalizowanych obliczeń wpływu sprężania na stateczność dźwigarów blachownicowych.

AN INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PRESSTRESSING ON THE STABILITY OF PLATE GIRDERS

Summary. Into the paper has been presented the results of experimental investigations on the influence of the technological prestressing on the stability of plate girders. In results of investigations was obtain the values of internal forces and moments which were created into the process of prestressing. On its bare were check condition of standard stability prestressing and not prestressing plate girders.

1. WSTĘP

W wyniku wieloletniej eksploatacji konstrukcji stalowych urządzeń i maszyn, których głównymi elementami nośnymi są dźwigary cienkościenne, stwierdza się pojawienie zjawiska narastania trwałych ugięć tych konstrukcji, które często poprzedzają ich pęknięcie, a w rezultacie katastroficzne złamanie. Obecna polityka rynkowa dąży do minimalizacji kosztów inwestycyjnych, a tym samym ograniczenia zakupu nowych urządzeń i maszyn. Korzystniejszym rozwiązaniem staje się możliwość regeneracji uszkodzonych konstrukcji. Jedną z podstawowych, a zarazem najprostszych metod regeneracji dźwigarów blachownicowych jest proces sprężania technologicznego.

Tematem pracy są ustroje cienkościenne, więc poniższe rozważanie odnosi się do dźwigarów blachownicowych obciążonych siłą tnącą i momentem gnącym działającym względem osi największej bezwładności przekroju. Szerokie zastosowanie dźwigarów blachownicowych wynika z dużych możliwości kształtowania wymiarowego tych ustrojów, a co za tym idzie oszczędności materiału w porównaniu z kształtownikami walcowanymi oraz wykorzystania rezerwy plastycznej stali.

2. STATECZNOŚĆ KONSTRUKCJI

W artykule tym zajmiemy się analizą stateczności dźwigarów blachownicowych poddanych sprężaniu technologicznemu. Współcześnie projektowane elementy konstrukcji metalowych są zazwyczaj cienkościenne. Wobec tego istotnego znaczenia nabiera sprawdzanie stateczności elementów konstrukcyjnych i jej wpływu na nośność. Przez pojęcie konstrukcji cienkościennych rozumie się struktury, składające się z jednego lub kilku elementów cienkościennych, połączonych ze sobą wzdłuż wspólnych krawędzi.

Jedną z podstawowych zalet nowoczesnych konstrukcji cienkościennych jest ich lekkość, tzn. znacznie mniejszy ciężar własny niż konstrukcji tradycyjnych (grubościennych) przy tej samej, a niekiedy nawet większej nośności. Zmniejszenie ciężaru konstrukcji cienkościennej możliwe jest dzięki takiemu ukształtowaniu jej elementów nośnych, aby własności wytrzymałościowe materiału zostały możliwie najlepiej wykorzystane. Lekkość konstrukcji jest ściśle związana z oszczędnością materiałów i ekonomią. Inną zaletą elementów cienkościennych jest łatwość budowy i niski koszt dźwigarów o bardzo dużych wymiarach przekroju poprzecznego, dużych rozpiętościach i jednocześnie dużych nośnościach. W konstrukcjach grubościennych o ich nośności na ogół decyduje wytrzymałość, rozumiana najczęściej jako uplastycznienie jednego lub kilku przekrojów poprzecznych. Natomiast nośność stosowanych współcześnie cienkościennych struktur jest bardzo często zdeterminowana statecznością, a przy dopuszczeniu pracy po utracie stateczności ich uplastycznieniem.

Dla pewnych grup konstrukcji cienkościennych przekroczenie obciążenia krytycznego, nie oznacza wyczerpania ich nośności ani ich zniszczenia. Do konstrukcji cienkościennych, które mogą bezpiecznie pracować po utracie stateczności, zwłaszcza gdy była to lokalna utrata stateczności w zakresie sprężystym, należą płyty uźebrowane i dźwigary o ścianach uźebrowanych. Spośród konstrukcji o ścianach nieuźebrowanych, po utracie stateczności mogą bezpiecznie pracować tarce i płyty podparte na wszystkich brzegach oraz belki i słupy cienkościenne o ścianach płaskich.

Dźwigar cienkościenny może doznać lokalnej lub globalnej utraty stateczności, może wystąpić w nim wzajemne oddziaływanie tych dwóch postaci wyboczenia, a także mogą zaistnieć inne złożone postaci wyboczenia, jak np. wyboczenie giętno-skrętne czy zwichrzenie. Wyboczenie cienkościennych dźwigarów o ścianach płaskich jest najczęściej wyboczeniem lokalnym ich ścian. Wyboczenie lokalne ścian dźwigara zmienia znacznie charakter pracy całego dźwigara, ale działające w chwili wyboczenia obciążenie nie musi być i często nie jest obciążeniem niszczącym. W zależności od intensywności działającego obciążenia i geometrii dźwigara stan odkształcenia po wyboczeniu może być sprężysty lub sprężysto- plastyczny [1].

3. SPRĘŻANIE TECHNOLOGICZNE

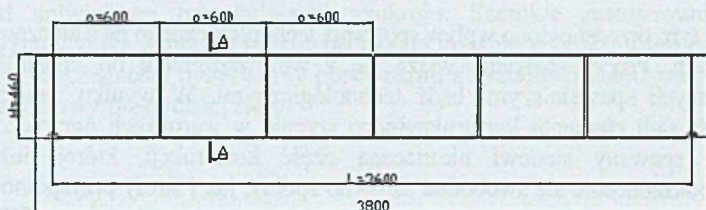
W artykule tym przedstawiono wpływ sprężania technologicznego na stateczność dźwigarów blachownicowych. Proces spawania wiąże się z wprowadzeniem do konstrukcji naprężeń własnych, zwanych spawalniczymi bądź technologicznymi. W wyniku nagrzania, podczas spawania, strefa stali elementu konstrukcyjnego stygnie w warunkach ograniczonej swobody skurczu. Styk spawany stanowi nieznaczną część konstrukcji, której duża sztywność uniemożliwia odkształcenie się swobodne zarówno spoiny, jak i strefy przyspoinowej materiału rodzimego. W tych warunkach powstają naprężenia własne spawalnicze, których wartość dochodzi do granicy plastyczności spawanej stali. Naprężenia technologiczne powodują określone skutki odkształceniowe w postaci deformacji elementu konstrukcyjnego. Metal stygnącej spoiny i stali w strefie przylegania do spoiny ma największą objętość bezpośrednio po zakrzepnięciu. Podczas dalszego ochładzania spoiny i przyległej stali występuje skurcz całej nagrzanej strefy złącza. W efekcie następuje odkształcenie spawanego elementu konstrukcyjnego.

Do regeneracji trwałych ugięć dźwigarów i sprężania nowych dźwigarów w celu zachowania ich nośności wykorzystuje się zjawisko skurczu spawalniczego spoin pachwinowych dodatkowych blach nakładkowych spawanych do blach środkowych oraz pasów dolnych. Wprowadzone naprężenia własne powodują przegięcie dźwigara wypukłością ku górze. Przyspawanie dodatkowych blach nakładkowych do pasa dolnego lub dolnej strefy środka powinno spowodować wygięcie dźwigara wypukłością ku górze. Wygięcie to powodują naprężenia skurczowe w strefach aktywnych, powstałych w miejscach ułożenia spoin. Wartość ugięcia może być regulowana grubością i długością spoin [4].

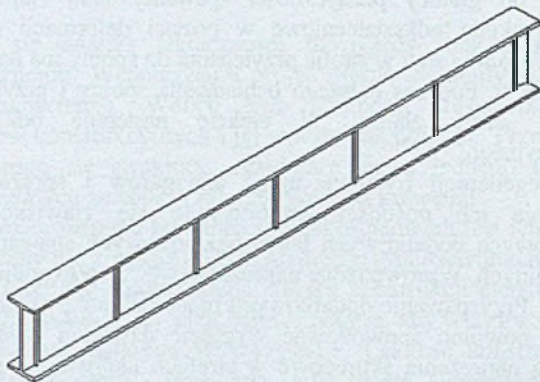
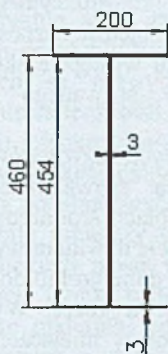
4. BADANIA EKSPERYMENTALNE WPŁYWU SPRĘŻANIA TECHNOLOGICZNEGO NA ODKSZTAŁCENIA DŹWIGARÓW BLACHOWNICOWYCH

Przedmiot badań stanowiła analiza wpływu sprężania technologicznego na stateczność dźwigarów blachownicowych. Porównania wpływu sprężania dokonano na przykładzie dźwigara niesprężonego (rys. 1a,b) oraz dźwigara sprężonego nakładką dolną (rys. 1c). W celu określenia rzeczywistych wartości sił i momentów sprężających powstałych w trakcie spawania poddano badaniom eksperymentalnym dźwigar blachownicowy sprężony nakładką dolną, co ilustruje zdjęcie na rys. 2.

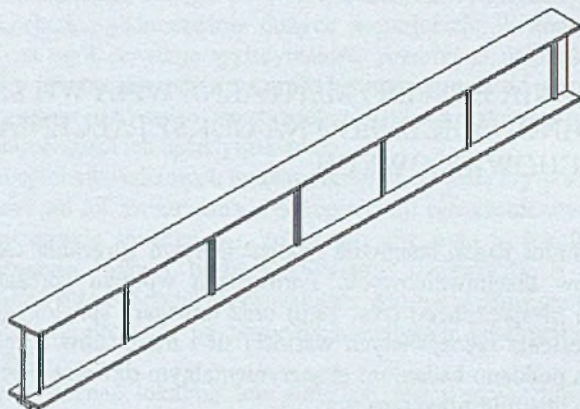
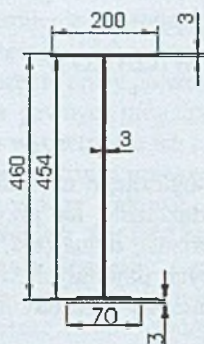
a)



b)



c)

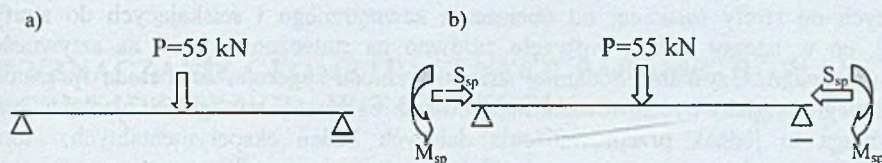


Rys. 1. Dźwigar blachownicowy: a) niesprężony – widok ogólny; b) niesprężony – przekrój A-A; c) sprężony – przekrój A-A



Rys. 2. Spawanie nakładki dolnej

W trakcie przeprowadzania procesu sprężania w dźwigarze są wprowadzone do strefy zewnętrznej naprężenia rozciągające i do strefy wewnętrznej naprężenia ściskające pochodzące od spawania. Po procesie sprężania i ostygnięcia dźwigara dokonano pomiaru strzałki ugięcia. Na rys. 3 przedstawiono schemat dźwigara niesprężonego (rys. 3a) oraz sprężonego nakładką dolną (rys. 3b). Pomiar ugięć pozwolił na zweryfikowanie modelu matematycznego i określenia rzeczywistych wartości sił i momentów powstałych w trakcie sprężania.



Rys. 3. Schemat dźwigara: a) niesprężonego, b) sprężonego

$$\text{Strzałka ugięcia: } f_s = M \cdot \frac{L \cdot L_s}{8EI_x};$$

Strzałka ugięcia uzyskana na drodze pomiarowej wyniosła 2,7 [mm], stąd:

$$\text{- moment sprężający: } M_{sp(ax)} = 29,34 \text{ [kNm];}$$

$$\text{- siła sprężająca: } S_{sp(ax)} = 138,07 \text{ [kN].}$$

Kolejnym etapem było przeprowadzenie obliczeń wg normy PN-90/B-03200. Przekrój rozpatrywanych dźwigarów zalicza się do klasy czwartej, a więc traci stateczność przy największych naprężeniach ściskających lub średnich ścinających mniejszych niż granica plastyczności. W tabeli 1 przedstawiono wyniki obliczeń normowych.

Tabela 1

Zestawienie obliczeń normowych

	Dźwigar niesprężony	Dźwigar sprężony
Nośność obliczeniowa przekroju przy jednokierunkowym zginaniu względem osi x-x $M_{RX} = \psi W_x f_d$	26,062 [kNm]	27,15 [kNm]
Nośność elementów jednokierunkowo zginanych względem osi x-x $\frac{M_x}{\varphi_L \cdot M_{RX}} \leq 1$	1,92 warunek niespełniony	0,744 warunek spełniony
Nośność obliczeniowa przekroju przy ścinaniu siłą poprzeczną V= 55 kN $V_R = 0,58 \varphi_{Dv} A_v f_d \quad V \leq V_R$	87,298 [kN]	87,298 [kN]
Nośność obliczeniowa zredukowana $M_{RXV} = M_{RX} \left[1 - \frac{I_x(V)}{I_x} \cdot \left(\frac{V}{V_R} \right)^2 \right]$	23,25 [kNm]	24,54 [kNm]
Nośność elementów jednokierunkowo zginanych z uwzględnieniem ścinania $M_x \leq M_{RXV}$ oraz $V \leq 0,3V_R$	$M_x = 49,5 \leq 23,25$ warunek niespełniony $V = 55 \leq 87,29$ warunek spełniony	$M_x = 20,16 \leq 24,54$ warunek spełniony $V = 55 \leq 87,298$ warunek spełniony
Nośność elementów ściskanych i zginanych $\frac{N}{\varphi_L N_{RC}} + \frac{\beta_x M_{xmax}}{\varphi_L M_{RX}} \leq 1 - \Delta_1$	1,92 ≤ 1 warunek niespełniony	0,367 ≤ 0,948 warunek spełniony

5. PODSUMOWANIE

Przedstawione wyniki obliczeniowe pozwalają na stwierdzenie, że w wyniku sprężania technologicznego nastąpił wzrost zarówno stateczności, jak i sztywności dźwigarów. Podczas gdy dla dźwigara niesprężonego warunki nośności nie zostały spełnione, dla dźwigara sprężonego obserwujemy wyraźny wzrost stateczności. W wyniku sprężania uzyskano przecięcie dźwigara wypukłością ku górze, co zaowocowało wprowadzeniem naprężeń rozciągających do strefy ściskanej od obciążenia zewnętrznego i ściskających do strefy rozciąganej, co w istotny sposób wpłynęło zarówno na stateczność, jak i na sztywność dźwigara sprężonego. Uzyskanie dodatniej strzałki wzniosu sugeruje, że metoda sprężania technologicznego mogłaby być stosowana w procesach regeneracji dźwigarów blachownicowych. Wymaga to jednak przeprowadzenia dalszych badań eksperymentalnych, które pozwoliłyby opracować proces postępowania dla konkretnych przypadków.

Dalsze badania będą kontynuowane dla przypadku sprężania nakładkami bocznymi i łącznie bocznymi i dolną. W literaturze stateczności przyjmuje się, że ścianka środka zawarta między przeponami pracuje samodzielnie jako tarcza podparta przegubowo wzdłuż wszystkich krawędzi. Jest to niewątpliwie duże uproszczenie, dlatego w dalszym toku badania będą obejmować zarówno wpływ sprężania technologicznego na stateczność, jak również będą miały na celu uwzględnienie rzeczywistej współpracy tarczy z otaczającym materiałem. Badania doświadczalne dają wyniki najbliższe rzeczywistemu stanowi naprężenia i odkształcenia, pozwalając na modyfikację modelu obliczeniowego.

Literatura

1. Królak M.: Stany zakrytyczne i nośność graniczna cienkościennych dźwigarów o ścianach płaskich. Warszawa-Łódź 1990.
2. Łubiński M., Filipowicz A., Żółtowski W.: Konstrukcje metalowe cz. I. „Arkady” Sp z o. o., Warszawa 2003.
3. PN-90/B-03200. Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie. Wydawnictwo Normalizacyjne.
4. Blum A.: Diagnostyka i regeneracja wytrzymałościowa skrzynkowych mostów suwnicowych. Instytut Technologii Eksploatacji w Radomiu, Radom 2002.
5. Wolmir A.S.: Ustojeżiwost deformirujemych sistiem. Izdatielstwo „Nauka”, Moskwa 1967.
6. Królak M., Kołakowski Z.: Stateczność cienkościennego dźwigara obciążonego siłą normalną i momentem gnącym. Archiwum Budowy Maszyn, T. XXX, Warszawa 1983.