

Wykorzystanie blach falistych jako środników w dźwigarach stalowych

Od małogabarytowych konstrukcji po wielkie konstrukcje mostowe

Grażyna Łagoda*, Marek Łagoda**, Marcin Górecki***

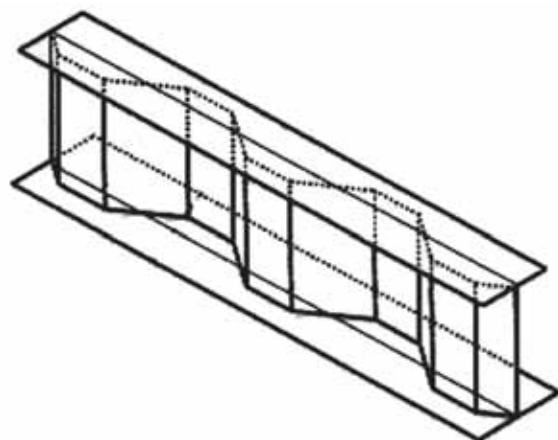
1. Wprowadzenie

Dźwigary stalowe ze środnikami falistymi (rys. 1) to konstrukcje, które stosowano juź w latach 60. XX w. W ciągu kilkunastu lat, jakie upłynęły od ich wprowadzenia, nie były zbyt popularne, pomimo że ich zalety podkreślano juź od pierwszych zastosowań. Wynikało to z trudności technologicznych, które zwiększały koszty ich wykonania. Głównym, ale nie jedynym powodem, dla którego postanowiono poświęcić więcej uwagi tego typu belkom, stało się zautomatyzowanie procesu ich wytwarzania, a co się z tym wiąże, obniżenie kosztów wyrobu.



Rys. 1. Fragment dźwigara z falistym środnikiem

 rodniki omawianych blachownic nie muszą przyjmować kształtów sinusoidalnych, ale mogą wykorzystywać równieź profil trapezowy (rys. 2).



Rys. 2. Fragment dźwigara z trapezowym środnikiem

2. Przesłanki do zastosowania blach falistych jako środników

Prowadzone bardzo intensywnie prace nad rozwojem nowych gatunków stali, mające na celu poprawienie jakości i trwałości konstrukcji, obniżenie kosztów ich wytwarzania i montażu,

zmniejszenie kosztów utrzymania obiektów, a także poprawienie ich estetyki, maksymalne uproszczenie w projektowaniu oraz ułatwienie powtórnej przeróbki materiału [1], otworzyły nowe możliwości projektowe w budownictwie. Przeprowadzenie odpowiednich zabiegów technologicznych umożliwiło walcowanie grubszych elementów bez zmian granicy plastyczności w zależności od grubości elementu. Huty dostały szansę wytwarzania elementów o znacznych grubościach bez pogorszenia właściwości mechanicznych stali. Dzięki takim właściwościom możliwe jest wykonywanie przekrojów krępych, z grubymi pasami, należących do przekrojów niźszych klas [2]. Norma europejska EN 1993-2: *Konstrukcje stalowe. Część 2: Mosty* dopuszcza (równieź do połączeń spawanych) blachy o grubości do 250 mm.

W typowych dźwigarach dwuteowych  rodniki ze względu na swoje wymiary, jak równieź charakter pracy, jaką wykonują w całym układzie konstrukcyjnym, wymagają usztywnień pionowych. Za tego typu wzmocnienie służą żebra pionowe, spawane do środników, które często ze względów konstrukcyjnych są nierównomiernie rozmieszczone. Zaburzony jest wówczas rytm elementów, co wpływa niekorzystnie na wyglądn boczny ustroju nośnego [3].

Idealnym rozwiązaniem byłoby wyeliminowanie dotychczas stosowanych  zeber usztywniających w dźwigarach nie tylko o mniejszych wysokościach konstrukcyjnych, ale i w tych najwyższych, jakie stosuje się w budownictwie mostowym. Rozwiązały to równocześnie trudności związane z technologią ich wykonania. Aby ominąć problem z użyciem usztywnień pionowych, w ostatnim czasie w nowoczesnych konstrukcjach projektanci zaczęli stosować  rodniki z blach giętych. Do wykonania środników falistych używa się zazwyczaj stali nowej generacji – stali, które nazywane są skrótowo HPS (*High Performance Steel*), oznaczających się większą wytrzymałością, granicą plastyczności, twardością, spawalnością, odpornością na kruche pęknięcia, podatnością do formowania na zimno oraz odpornością na korozję w porównaniu ze stalami tradycyjnymi [1].

W typowych mostach blachownicowych lub skrzynkowych duża część przekroju nie bierze pełnego udziału w przenoszeniu obciążeń (zwłaszcza momentów zginających). Dotyczy to przede wszystkim środników, dających w konsekwencji znaczny balast dla konstrukcji. Koszt zaprojektowanej konstrukcji nośnej zależy od tzw. ogólnego współczynnika przekroju ρ_G , który wynosi:

$$\rho_G = \frac{q}{p + q} \quad (1)$$

gdzie:

q – obciążenie uźytkowe (zmienne + stałe), p – obciążenie cięźarem własnym.

Wartość obciążenia od cięźaru własnego zależy bezpośrednio od przekroju konstrukcji nośnej A , zaś nośność przekroju na zginanie od jego momentu bezwładności J . Promień bezwładności wynosi:

$$r^2 = \frac{J}{A} \quad (2)$$

W przekroju belki z cienkim środnikiem, a więc o skupionych masach w skrajnych położeniach (górnym i dolnym), określonych odległościami od osi obojętnej y_g , y_d , promień bezwładności jest maksymalny i wynosi:

$$r_{\max}^2 \approx y_g y_d \quad (3)$$

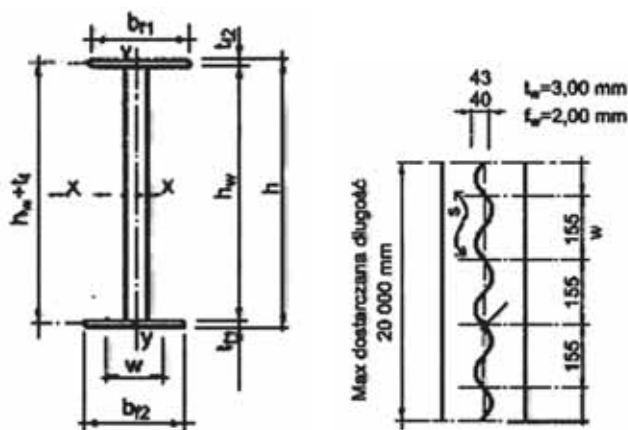
Współczynnik przekroju konstrukcji można więc zapisać:

$$\rho_s = \frac{r^2}{r_{\max}^2} = \frac{J}{y_g y_d A} \quad (4)$$

Współczynnik ten dla idealnego przekroju zmierza do jedności. W pasach takich belek występują decydujące siły wewnętrzne, zwiększa się promień bezwładności przekroju i współczynnik ρ_s z uwagi na skupienie masy w pasach na krańcach przekroju poprzecznego. Sprawia to, że redukcja obciążenia ciężarem własnym nie powoduje obniżenia nośności.

Na atrakcyjność wykorzystania pofałdowanych środników, poza właściwościami stali HPS, wpływa fakt, że ciężar dźwigara jest dużo mniejszy niż przy zastosowaniu płaskich środników, zwłaszcza w przypadku przekrojów krępych lub środników z dodatkowym usztywnieniem. Można również zaobserwować, że pofałdowanie środnika poprawia wygląd obiektu. Falistość wywołuje inne wrażenie z punktu widzenia estetyki. Dźwigar staje się wizualnie dużo „lżejszy”, a jednocześnie operowanie promieni słonecznych daje ciekawy efekt płynnego przejścia nasłonecznionych pól w strefy zacienione.

Pomimo znaczących osiągnięć w tej dziedzinie, nie ma obecnie opracowanych ścisłych teorii pracy belek z falistym środnikiem i zasad ich obliczania. Wskutek falistości środnik nie może przenosić naprężeń normalnych, pochodzących od obciążenia momentem zginającym. Środnik falisty spełnia więc jedynie rolę skratowania, jak w belkach kratowych z pasami równoległymi i przenosi ścinanie pionowe [4]. Z uwagi na znikomą sztywność podłużną środnika zmiana odkształceń jednego pasa nie wpływa na zmianę odkształceń drugiego pasa. Największy problem sprawiają naprężenia powstałe w wyniku ścinania w strefie środnika. Dźwigary z falistymi środnikami, które są na potrzeby budownictwa przemysłowego produkowane w Polsce, wykonywane są według technologii austriackiej. Posiadają one oznaczenia WTA, WTB, WTC, w zależności od grubości środnika (2,0; 2,5; 3,0 [mm]). Na rysunku 3 przedstawiono taki dźwigar.



Rys. 3. Wymiary produkowanych w Polsce blachownic z falistymi środnikami [4]

Do czasu opracowania w Polsce jednoznacznych zasad obliczania belek z falistym środnikiem, występuje możliwość posługiwania się np. normami stosowanymi w Niemczech. W celu uwzględnienia podatności środnika należy wprowadzić (według DIN-18800) moduł ścinania środnika (5):

$$G^* = G \left(\frac{w}{s} \right) \quad (5)$$

gdzie:

G^* – moduł ścinania środnika,
 G – moduł sprężystości poprzecznej,
 w , s – zgodnie z rys. 3.

Moduł ścinania umożliwia ustalenie wpływu siły poprzecznej na ugięcie dźwigara. Przepisy niemieckie dotyczące wyznaczania ugięcia belki sugerują, aby w zależności od smukłości wprowadzić współczynnik zwiększający w granicach $1,02 \div 1,3$.

Przy określaniu nośności dźwigara na zginanie można posłużyć się analogią kratownicową. Nośność pasa górnego i dolnego można wyznaczyć jak w przypadku kratownicy z pasami równoległymi. W pasie ściskanym konieczne jest uwzględnienie wybożenia ogólnego (zwichrzenia) i wybożenia lokalnego (miejscowego). Wybożenie pasa ściskanego można uwzględnić z pominięciem wpływu utwierdzenia środnika. Norma niemiecka zaleca dla uwzględnienia stateczności miejscowej pasa wprowadzenie zredukowanej szerokości pasa (6) oraz zastosowanie współczynnika niestateczności przy ścinaniu. Takie założenie wpływa korzystnie na poziom bezpieczeństwa,

$$b = \frac{b_{f1}}{2} - 1 \quad [\text{mm}] \quad (6)$$

gdzie:

b – zredukowana szerokość pasa,
 b_{f1} – zgodnie z rys. 3.

Zgodnie z zaleceniami DIN-18800 nośność pasa zależy także od gatunku stali.

Dotychczasowe zastosowania

Poza niewielkimi dźwigarami dwuteowymi stosowanymi dość powszechnie w budownictwie ogólnym, szczególnie przy budowie hal, większe konstrukcje zaczynają pojawiać się również w mostownictwie. Most Parc Astèrix, wybudowany we Francji jest jednym z mostów z typowym środnikiem falistym, do którego przyspawane są dwa pasy: górny i dolny w formie blach płaskich [6]. Tego typu dźwigary przybrały skrót CWG (*Corrugated Web Girder*).

Zalety falistych środników zostały wykorzystane w wielu krajach również w mostach o nowym typie konstrukcji, zwanej PCS, tj. sprężonej konstrukcji zespolonej (*Prestressed Composite Structure*). Głównymi elementami składowymi takich mostów są dwie płyty betonowe i środniki (płaskie, kratowe, fałdowe) [5]. Intensywny rozwój tych rodzajów konstrukcji odnotowuje się zwłaszcza w Japonii i we Francji. Budowane są najczęściej w technologii montażu nawisowego (wspornikowego) lub z poprzecznych prefabrykatów sprężanych podłużnie. Na rysunku 4 a przedstawiono most Hondani w Japonii podczas budowy, zaś na rysunku 4 b widok ogólny gotowego obiektu.



Rys. 4 a. Hondani Bridge, Japonia. Widok podczas budowy



Rys. 4. b. Hondani Bridge, Japonia. Widok ogólny gotowego obiektu [9]

Przegląd badań dźwigarów ze środnikami falistymi

Pierwsze badania dotyczące wytrzymałości dźwigarów CWG przy występowaniu stałego ścinania prowadzili w Niemczech: Linder i Aschinger. Amerykanie Abbas, Driver i Sause badali zachowanie się dźwigarów ze środnikami falistymi przy naprężeniach wywołujących nie tylko ścinanie, ale także skręcanie również w aspekcie zmęczenia tych konstrukcji [6].

Abbas prowadził kolejno badania teoretyczne i eksperymentalne oraz analizy przy użyciu metody elementów skończonych, które doprowadziły do stwierdzenia, że dźwigary dwuteowe ze środnikami z blach giętych będą się jednocześnie skręcały ze swojej płaszczyzny, jak i wyginały w płaszczyźnie środnika pod wpływem obciążenia przyłożonego pionowo do pasa. Na rysunku 5 przedstawiono wyniki analizy obliczeniowej dwuteowego dźwigara ze środnikiem trapezowym. Aby określić pełny stan naprężeń, naprężenia wynikające z poprzecznego wygięcia pasa dźwigara powinny być nałożone na naprężenia wynikające z wygięcia z płaszczyzny trapezowego środnika.



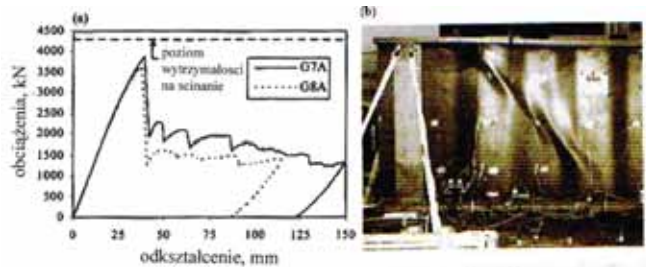
Rys. 5. Wygięcie poprzeczne półki w dwuteowych dźwigarach ze środnikiem trapezowym, wyznaczone metodą elementów skończonych [6]

W literaturze fachowej dostępne są publikacje związane z wybočeniami ogólnym, jak i wybočeniami lokalnym badanych dźwigarów z pofalowanym środnikiem. Obserwacje takie prowadzone były jedynie dla modeli blachownic, które charakteryzowały się stosunkowo małymi wymiarami w porównaniu ze stosowanymi dźwigarami w budownictwie mostowym. Abbas i Driver postanowili zbadać belki dwuteowe w skali rzeczywistej [6]. Dźwigary te wykonane zostały ze stali wysoko wytrzymałościowej S485W ze środnikiem trapezowym zgodnie z wytycznymi, które proponował Elgaaly [7].

Po przeprowadzeniu badań na dwóch dźwigarach przy zastosowaniu obciążenia wywołującego naprężenia ścinające, okazało się, że wyniki testów dotyczących modeli o dużo mniejszej skali, wykonanych zgodnie z proponowanymi założeniami projektowymi, przewyższają możliwości wytrzymałościowe środników ze względu na ścinanie w strefach przypodporowych. Zdaniem wykonujących badania, wytyczne według których wykonali modele przeznaczone do badań w skali rzeczywistej, tylko w ok. 70% uwzględniały naprężenia ścinające powstające w środniku. Przedstawili oni swoje wyniki na wykresie zależności odkształceń od przyłożonych sił obciążających (rys. 6 [6]).

Można zaobserwować, że nastąpiło trwałe odkształcenie dźwigarów na dużo niższym poziomie w stosunku do granicy wytrzymałości

na ścinanie. Abbas i Driver uzasadniają niezgodność wyników własnych analiz z założeniami projektowymi możliwością wystąpienia naprężeń powstałych w wyniku kształtowania środnika, jak również nieliniowością profilu trapezowego ze względu na różnice wynikające ze skali modeli.



Rys. 6. Wyniki badań od obciążeń wywołujących naprężenia ścinające dla dźwigarów CWG ze środnikiem trapezowym o oznaczeniach G7A i G8A: a) wykres odkształceń od obciążeń, b) deformacja dźwigara G8A po uszkodzeniach [6]

Podsumowanie

Dźwigary stalowe z pofalowanymi środnikami są konstrukcjami, które mogą znaleźć szerokie zastosowanie w budownictwie – od małogabarytowych konstrukcji aż po wielkie konstrukcje mostowe. Poza ciekawym wyglądem posiadają wiele innych zalet, przede wszystkim konstrukcyjnych, m.in. mniejszy ciężar konstrukcji w porównaniu z tradycyjnymi dźwigarami ze środnikami płaskimi, brak dodatkowych blach usztywniających, zautomatyzowanie produkcji.

Pomimo trudu naukowców włożonego w opracowanie wytycznych projektowych, zagadnienia związane z pracą takich konstrukcji, a zwłaszcza problemy stateczności, nośności w warunkach obciążeń statycznych i dynamicznych CWG oraz wpływu geometrii środników, wymagają prowadzenia dalszych prac badawczych. Zachodzi też potrzeba zbadania, jakie różnice występują w pracy dźwigarów ze środnikami z profili sinusoidalnych i trapezowych. Należy również dążyć do opracowania ostatecznych rozwiązań, umożliwiających bezpieczne projektowanie dźwigarów ze środnikami z blach pofalowanych.

Literatura

1. Łagoda M.: *Nowe gatunki stali*. „Materiały Budowlane” 2005, nr 4, s. 95–97.
2. Łagoda G., Łagoda M.: *Nowości w polskim budownictwie mostów stalowych*. „Materiały Budowlane” 2006, nr 4, s. 90–92.
3. Łagoda G.: *Wybrane nowości w technice mostowej i ich wpływ na estetykę mostów*. „Inżynieria i Budownictwo” 1999, nr 9, s. 499–503.
4. Łubiński M., Żółkowski W.: *Konstrukcje metalowe*. Warszawa 1992.
5. Łagoda G., Łagoda M.: *Mosty PCS i Extradose – konstrukcje XXI wieku*. „Materiały Budowlane” 2004, nr 10, s. 78–82.
6. Abbas H.H., Kim B.-G., Sause R.: *Unconventional high performance steel bridge girder system*. Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Performance and Cost. “JABMAS 2006” Lehigh University. Bethlehem 2006.
7. Elgaaly M., Hamilton R.W., Seshadri A.: *Shear strength of beams with corrugated webs*. “Journal of Structural Engineering” 1996, no 4, pp. 390–398.
8. Ferenc K., Ferenc J.: *Konstrukcje spawane. Projektowanie połączeń*. Warszawa 2000.
9. *Development of Technology for Expressway Bridges*. Japan Highway Public Corporation (Nihon Doro Kodan). Tokyo–Osaka 1998.

* Dr hab. inż., Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska.

** Dr hab. inż. Wydział Inżynierii Budowlanej i Sanitarnej, prof. Politechniki Lubelskiej, Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa.

*** Mgr inż., Wydział Inżynierii Budowlanej i Sanitarnej, Politechnika Lubelska.