

# Praktyczne aspekty projektowania wzmocnionych blach fałdowych

Prof. dr hab. inż. Antoni Biegus, dr inż. Dariusz Czepiżak, Politechnika Wroclawska

## 1. Wprowadzenie

Projektowanie jednoprzęsłowych blach fałdowych jest nieekonomiczne, gdyż ich obciążenia graniczne obliczone z warunku ugięcia są zdecydowanie mniejsze od wyznaczonych na podstawie kryterium nośności. Często jednak, z powodu interakcyjnego wyężenia zginanych i dociskanych przekrojów podporowych, nośność wieloprzęsłowych blach fałdowych jest mniejsza niż konstrukcji jednoprzęsłowych. Mankamenty wytrzymałościowe, utrudniony montaż i transport ustrojów wieloprzęsłowych nie występują w rozwiązaniach zaproponowanych w [1]. Polegają one na użyciu elementów o długościach quasi pojedynczych przęseł i zakładkowego łączenia na montażu lub wzmacniania stref podporowych dodatkową blachą fałdową (rys. 1).

Otrzymuje się w ten sposób konstrukcje ciągłe, o regulowanej nośności ich

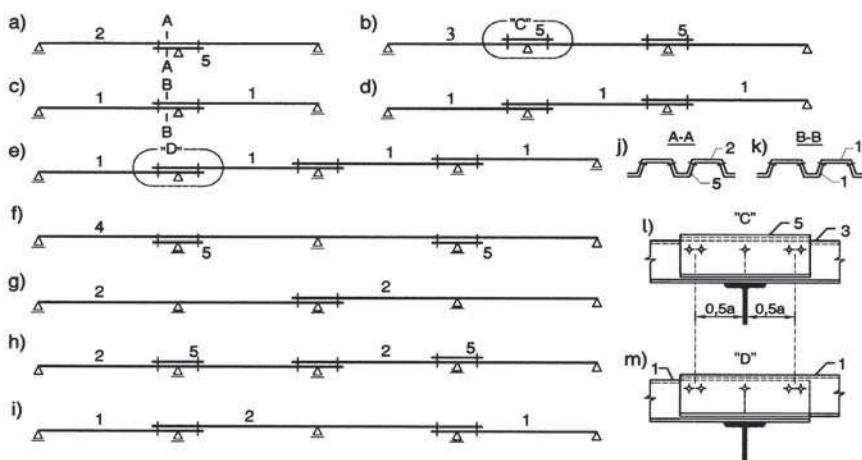
stref podpór pośrednich, adekwatnej do wyężenia. Umożliwia to korzystną redystrybucję sił wewnętrznych, wzmocnienie ekstremalnie wyężonych stref oraz dogodny transport i montaż konstrukcji. Modele oceny bezpieczeństwa tych ustrojów są złożone. Wynika to z ich niekonwencjonalności i wieloparametryczności (m.in. nieliniowości geometrycznej i fizycznej, wariantowości rozwiązań wzmocnień, interakcyjnego wyężenia cienkościennego przekroju podporowego). Ponadto siły wewnętrzne w takich ustrojach różnią się w stosunku do obliczonych w konstrukcjach o stałej sztywności na długości. W Politechnice Wroclawskiej wykonano kompleksowe badania (doświadczalne, numeryczne i analityczne) interakcyjnej nośności zdwojonych przekrojów blach fałdowych oraz nośności granicznej tych konstrukcji, a także wykonano analizy optymalizacyjne ich długości wzmocnienia [2, 5].

## 2. Wyniki badań i analiz wzmocnionych blach fałdowych

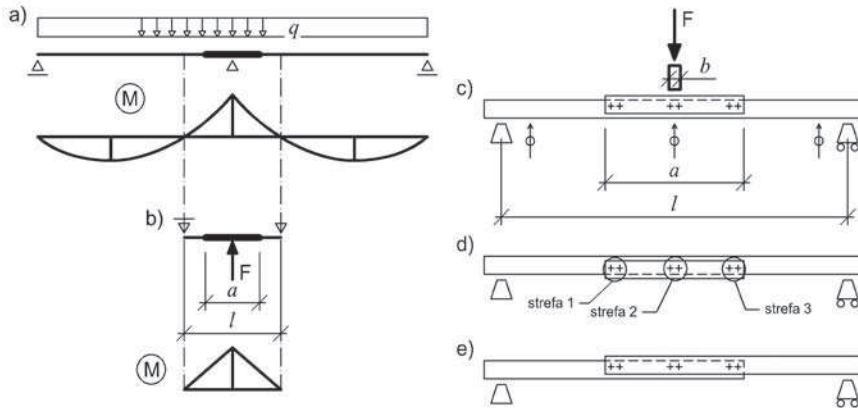
Przekrojami krytycznymi równomiernie obciążonych wieloprzęsłowych blach fałdowych są strefy podpór pośrednich (rys. 2a). Ich interakcyjną nośność graniczną można określić [6] na podstawie badań zastępczych modeli jednoprzęsłowych, obciążonych w środku rozpiętości skupionym obciążeniem  $F$ , przekazywanym przez element wiernie odwzorowujący sposób oparcia dźwigara na podporze pośredniej (rys. 2b). Rozpiętość przęseł modeli jest tak dobrana, aby zapewnić wyężenie pod siłą skupioną identyczne z wyężeniem w ustroju rzeczywistym.

Zbadano doświadczalnie 35 modeli (w skali naturalnej) jednoprzęsłowych blach fałdowych T55×188×0,75 (rys. 3). Zmiennymi parametrami badań były:

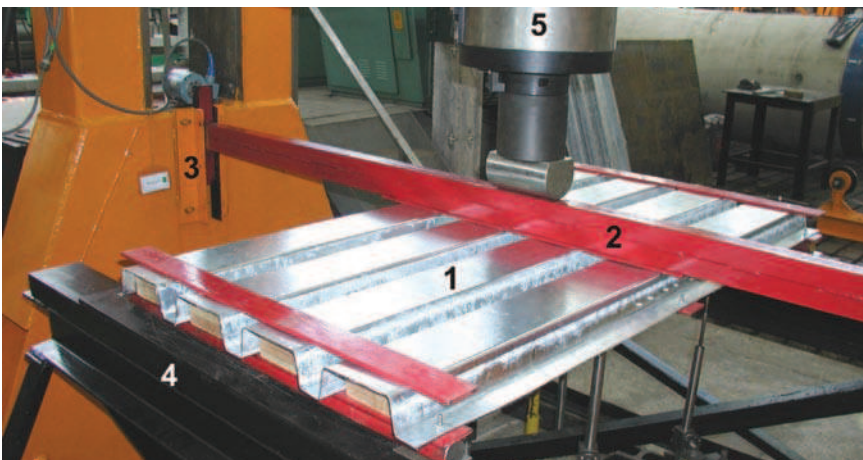
- długości wzmocnienia  $a$  i rozpiętości przęśla  $l$  (w ten sposób zmieniano wyężenie przekroju podporowego mierzone  $M/F$ ;  $M$  – moment zginający,  $F$  – siła docisku),
- pozycja (ułożenie „pozytyw” lub „negatyw”) blachy fałdowej w trakcie badań,
- sposób wzmocnienia: S – od strony włókien ściskanych (od góry – rys. 2c), R – od strony włókien rozciąganych (od dołu – rys. 2d), Z – na zakład (rys. 2e),
- sposób rozmieszczenia i liczba łączników w strefach 1, 2 i 3 (rys. 2d). Celem badań było m.in. określenie: nośności zdwojonych przekrojów podporowych blach fałdowych w interakcyjnych stanach wyężenia momentem zginającym  $M$  i doci-



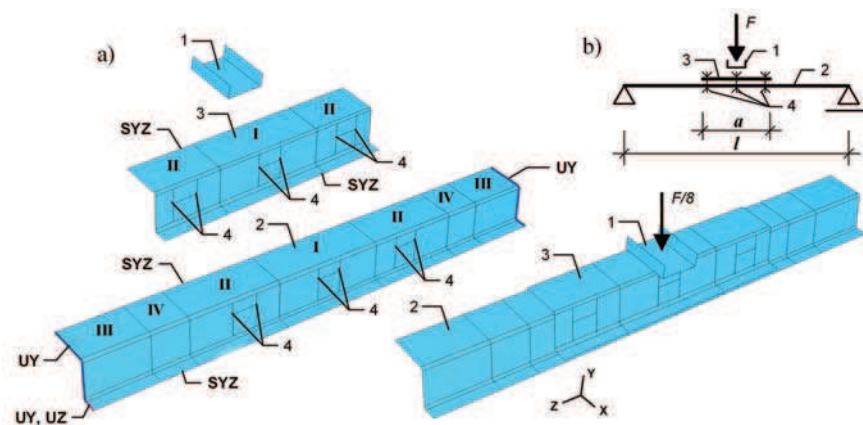
**Rys. 1.** Schematy ustrojów uciągłonych (c, d, e, g, i), lokalnie wzmocnionych (a, b, f) oraz uciągłonych i wzmocnionych (h); blacha fałdowa: 1 – jednoprzęsłowa, 2 – dwuprzęsłowa, 3 – trzyprzędłowa, 4 – czteroprzęsłowa, 5 – wzmacniająca



**Rys. 2.** Schematy badania nośności przekrojów krytycznych wzmocnionych blach fałdowych



**Rys. 3.** Jednoprzęsłowa wzmocniona blacha fałdowa na stanowisku badawczym: 1 – blacha fałdowa, 2 – belka, 3 – prowadnica, 4 – podpora, 5 – siłownik



**Rys. 4.** Przykład modelu numerycznego blachy fałdowej wzmocnionej nakładkowo od góry: a) model numeryczny, b) schemat statyczny, 1 – belka, 2 – blacha fałdowa, 3 – element wzmacniający, 4 – łączniki

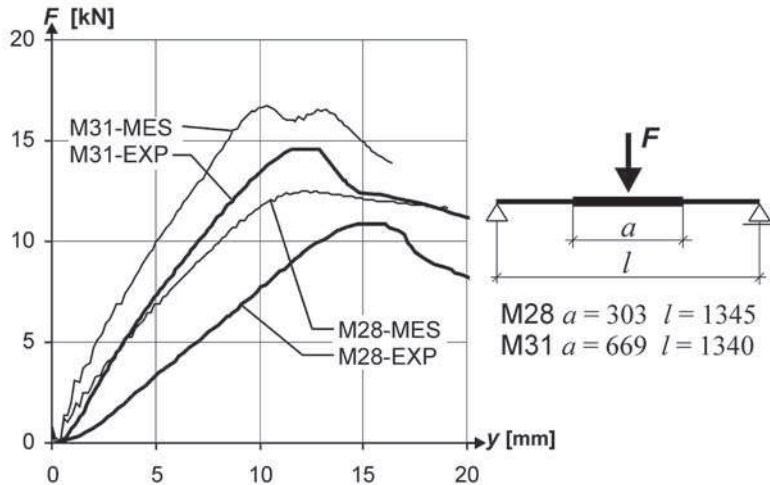
skiem  $F$ , ścieżek równowagi statycznej ustrojów oraz wpływu konstrukcji wzmocnienia na nośność ustroju. Szczegółowe wyniki tych badań omówiono w [2]. Informacje uzyskane z badań doświadczalnych stanowiły podsta-

wę do opracowania modelu numerycznego wyężenia konstrukcji [3]. Analizowano jednoprzęsłowe blachy fałdowe  $T55 \times 188 \times 0,75$  wzmocnione od strony włókien: ściskanych (rys.2c), rozciąganych (rys.2d) i uciążlonych zakładkowo (rys. 2e).

Obliczenia wykonano korzystając z programu ABAQUS 6.4 [5] (w module EXPLICIT służącym do analizy zagadnień nieliniowej dynamiki, który umożliwia badanie wyężen elementów w strefie ich kontaktu z uwzględnieniem tarcia, nieliniowości materiałowych i geometrycznych). W analizach przyjęto czterowęzłowe, powłokowe elementy skończone S4R, sprężysto-idealnie plastyczny model materiału oraz uwzględniono nieliniowość geometryczną ustroju i tarcie między elementami (1) i (2) (rys. 4).

Model numeryczny umożliwił wykonanie analiz parametrycznych wzmocnionych blach fałdowych, w których przyjęto zmienne decyzyjne takie same jak w przypadku badań doświadczalnych. Szczegółowe wyniki analiz ilościowych i porównawczych badanych, lokalnie wzmocnionych blach fałdowych podano w [3]. Otrzymane numerycznie postaci zniszczenia blach fałdowych były identyczne z wyznaczonymi doświadczalnie. W zależności od sposobu i długości wzmocnienia, położenia przekroju i rozpiętości przęśla, zniszczenie modeli następowało: w miejscu przyłożenia obciążenia w elemencie wzmacnianym, na końcu strefy wzmocnienia lub w miejscu przyłożenia obciążenia w obu blachach fałdowych – wzmacniającej oraz wzmacnianej.

Z porównania doświadczalnych i numerycznych ścieżek równowagi statycznej (ŚRS) modeli (rys. 5) wynika, że analiza MES zawyża sztywność ustroju. W większości modeli nachylenia wznoszących części ŚRS, wg obu metod, są do siebie zbliżone. Największe rozbieżności w oszacowaniu ugięć występują w przypadku modeli krótkich o  $M/F < 250$  Nmm/N lub/i modeli z  $a/l < 0,20$  (rozbieżność nawet o 57%). Różnice w oszacowaniu ugięć wynikają z idealizacji konstrukcji, jakiej dokonuje się budując model numeryczny. Między innymi w modelu MES nie uwzględniano wstępnych losowych imperfekcji geometrycznych ścianek, osi podłużnej,



**Rys. 5.** Doświadczalne (EXP) i numeryczne (MES) ścieżki równowagi statycznej lokalnie wzmocnionych blach fałdowych (przykładowych modeli M28 oraz M31)

wymiarów przekroju poprzecznego, które zmniejszają sztywność konstrukcji.

Analizy wyników badań MES nie wykazały znaczącego wpływu na nośność blach fałdowych zmiany liczby łączników w strefie wzmocnienia, ani wpływu sposobu wzmocnienia przekroju na nośność konstrukcji (różnice nie przekraczają 3%). Ponadto stwierdzono, że podwojenie nośności przekroju można uzyskać stosując wzmocnienia o długości  $a > 0,50l$ .

Złożoność modeli numerycznych i ich pracochłonność sprawia, że taki sposób oceny wytrzymałości konstrukcji nie jest przydatny w praktyce inżynierskiej. Dlatego opracowano model prętowy analizy badanych konstrukcji [4] (rys. 6). Uwzględnia on nieliniową zmianę sztywności na długości cienkościennego ustroju, sposób wzmocnienia i rozmieszczenia łączników, zakleszczanie się elementów i podatność połączeń.

Do rozwiązania zagadnienia stosowano połączone ze sobą: klasyczną metodę Ritz'a i MES. Zaproponowana metoda polega na wykorzystaniu elementów skończonych o funkcjach kształtu spełniających przemianowe warunki brzegowe (ugięcie i kąt obrotu) w węzłach siatki podziału. Takie podejście zapewnia, wraz z rosnącą dyskretyzacją konstrukcji, analogiczną zbieżność rozwią-

zania do wartości dokładnej, jak w przypadku sformułowania zadania wg metody Ritz'a.

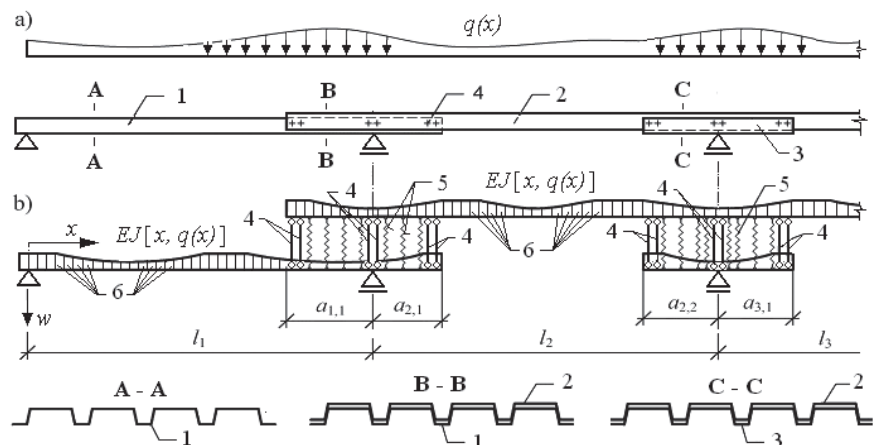
W celu praktycznego korzystania z tej metody oceny, wytrzymałości konstrukcji opracowano autorskie programy komputerowe. Umożliwiają one efektywne projektowanie konstrukcji (o dowolnej liczbie przęseł i rodzaju obciążenia) i ich optymalizację. Korzystając z tych programów wykonano analizy parametryczne. Wykazały one, że w wyniku stosowania zdwojonego przekroju, uzyskuje się znacznie większy wzrost nośności konstrukcji niż jej sztywności. Wzrost nośności konstrukcji jest około 40% większy od wzrostu jej sztywności. Badania doświadczalne pokazują, że ta dyspropor-

cja jest jeszcze większa i wynosi około 50%.

Analizy optymalizacyjne dwuprzęsłowych konstrukcji polegały na poszukiwaniu długości strefy wzmocnienia  $a_w$ , przy której występuje maksymalna nośność ustroju w stosunku do zużytego materiału. W tych badaniach zmieniano rozpiętość przęseł  $l_w = 3,0; 4,0; 5,0; 6,0$  m, długość wzmocnienia ( $a_w/l_w = 0,05; 0,10; 0,15; 0,20; 0,25$ ) oraz liczbę i rozmieszczenie łączników. Przeanalizowano łącznie około 170 modeli. Ustalono, że optymalna długość wzmocnienia dwuprzęsłowych blach fałdowych wynosi  $a_{opt} = 0,10 \div 0,16 l_w$  (gdzie  $l_w$  jest rozpiętością przęsła dwuprzęsłowej blachy fałdowej). Przy czym zmienia się ona w zależności od sposobu wzmocnienia, rozmieszczenia łączników i co więcej – rozpiętości przęseł (ponieważ badane zagadnienie ma charakter nieliniowy). Stwierdzono ponadto, że w przypadku analizowanych blach fałdowych efekt zwiększenia nośności konstrukcji jaki uzyskuje się w skutek zastosowania optymalnej długości wzmocnienia wynosi 53 ÷ 91%. Jest to znaczny wzrost nośności konstrukcji.

### 3. Wytyczne projektowania wzmocnionych blach fałdowych

Wykonane badania i analizy wzmocnionych lokalnie blach fał-



**Rys. 6.** Schemat konstrukcyjny (a) i schemat statyczny (b) ustroju: 1, 2 – element cienkościenny, 3 – element wzmocniający, 4 – łączniki, 5 – warstwa sprężysta, 6 – element skończony



dowych pozwoliły przyjąć praktyczne uogólnienia i wskazówki dotyczące ich projektowania:

a) Wzmocnienia na zakład, od dołu lub od góry, wieloprzęstowych blach fałdowych zapewniają porównywalny wzrost nośności i sztywności konstrukcji.

b) Najkorzystniejsze są rozwiązania wzmocnienia blach fałdowych z łącznikami usytuowanymi na końcach „zakładki” lub arkusza wzmacniającego. W przypadku wzmocnienia od dołu, można nie stosować łączników na końcach podkładki i dać tylko łączniki szczerwne zapobiegające przemieszczaniu się jej podczas montażu.

c) Sił w łącznikach nie można szacować wg klasycznego modelu wyznaczania wyężenia zakładkowych połączeń śrubowych obciążonych momentem zginającym.

d) W przypadku analizowanych modeli, siły ścinające łączniki były mniejsze od 1 kN.

e) Przyjmując długość wzmocnienia dwuprzęstowej blachy fałdowej  $a_w \geq 0.12l_w$  ( $l_w$  – rozpiętość prze-

śla dwuprzęstowego ustroju) uzyskuje się co najmniej 50% wzrost nośności konstrukcji w stosunku do ustroju dwuprzęstowego niewzmocnionego. Jednocześnie można przyjąć, że nie wzrasta istotnie sztywność konstrukcji.

f) Analizowane sposoby wzmocnienia badanych konstrukcji z optymalnymi długościami stref wzmocnienia  $a_w = 0,10 \div 0,16l_w$  zwiększają ich nośności o 58 ÷ 90% w stosunku do blach fałdowych o pojedynczym przekroju.

g) Zaproponowany prętowy model analityczny (rys. 6) zapewnia stosunkowo krótki czas obliczeń konstrukcji, zadowalającą dokładność analiz oraz kompleksowe informacje o wyężeniu i zachowaniu się lokalnie wzmocnionych blach fałdowych. Przedstawione wnioski i wytyczne dotyczą projektowania blach fałdowych o przekrojach poprzecznych pierwszej generacji (bez przetłoczek podłużnych i poprzecznych ich ścianek). Jednak procedury obliczeniowe modelu prętowego umożliwiają badanie blach fałdo-

wych o przekrojach poprzecznych (drugiej i trzeciej generacji) oraz o dowolnych schematach statycznych ustroju i dowolnym sposobie jego wzmocnienia.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Biegus A., Lokalnie wzmocnione blachy fałdowe. Inżynieria i Budownictwo nr 2/2001
- [2] Biegus A., Czepizak D., Badania interakcyjnej nośności zginanych i dociskanych przekrojów wzmocnionych blach fałdowych. 52 Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Krynica 2006
- [3] Biegus A., Czepizak D., Analizy numeryczne nośności lokalnie wzmocnionych blach fałdowych. 53. Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Krynica 2007
- [4] Biegus A., Czepizak D., Zaawansowany model prętowy wieloprzęstowych konstrukcji cienkościennych o zdwojonych przekrojach stref podpór. 54 Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Krynica 2008
- [5] Czepizak D., Nośność graniczna lokalnie wzmocnionych wieloprzęstowych blach fałdowych. Rozprawa doktorska, Instytut Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Dolnośląska Biblioteka Cyfrowa <http://www.dbc.wroc.pl/publication/1244>, Wrocław 2006
- [6] PN-EN 1993-1-3: Eurokod 3 – Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-3: Reguły uzupełniające dla konstrukcji z kształtowników i blach giętych na zimno. PKN, Warszawa 2007

**PAGEL®-POLSKA**



**PAGEL® - SPECJALISTYCZNE MATERIAŁY DLA BUDOWNICTWA**

- Zaprawy do podlewek
- Zaprawy do napraw konstrukcji żelbetowych
- Ochrona betonu
- Posadzki przemysłowe

**PAGEL – POLSKA**  
 Ul. Lipowa 7, Komorniki, 55-300 Środa Śląska  
 Tel. 71 – 317 28 06, fax. 71 – 317 61 36  
[www.pagel.pl](http://www.pagel.pl), [info@pagel.pl](mailto:info@pagel.pl)