

dr hab. inż. Witold Basiński<sup>1)</sup>  
ORCID: 0000-0002-9306-4569

# Badanie procesu zniszczenia dźwigarów o falistym środniku w strefach przypodporowych

## *Investigation of the failure mode process of girder with corrugated web in the support zones*

DOI: 10.15199/33.2024.02.01

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono analizę badań nośności postaciowej falistego środnika wspornikowych dźwigarów SIN z żebrami podporowymi ze szczególnym uwzględnieniem zniszczenia w obszarze pogranicznym. Badania doświadczalne przeprowadzono na dziesięciu dźwigarach o wysokości środnika 500, 1000, 1250 i 1500 mm. Dźwigary o schemacie statycznym belki swobodnie podpartej z jednostronnym wspornikiem zbudowano z elementów połączonych doczołowo na śruby sprężone. Przeanalizowano postacie zniszczenia dźwigarów oraz ścieżki równowagi statycznej wraz z ich bezpośrednim wpływem na formę zachowania w obszarze pogranicznym. Oszacowano wartość obciążenia odpowiadającego formowaniu krzyżulca rozciąganego w środniku, łączącego skrajne punkty obramowania w stanie pogranicznym na poziomie wynoszącym 0,39 – 0,67 nośności granicznej.

**Słowa kluczowe:** dźwigary o falistym środniku typu SIN; obciążenie graniczne; pograniczny stan zniszczenia; obciążenie w stanie pogranicznym.

**Abstract.** The paper presents an analysis of the tests of the shear resistance of the wavy web of SIN cantilever girders with support stiffeners, with particular emphasis on failure in the post limit zone. Experimental tests were carried out on ten girders with web heights of 500, 1000, 1250 and 1500 mm. The girders with the static scheme of a simply supported beam with a one-sided cantilever were built from samples connected butt-together with prestressed bolts. The failure modes of girders and the load - displacements paths were analyzed along with their direct impact on the form of behavior in the post limit zone. The value of the load corresponding to the formation of a tension diagonal in the web connecting the extreme points of the frame in the post limit state was estimated at a level ranging from 0,39 to 0,67 of the limit load.

**Keywords:** girders with corrugated web type SIN; limit load; post limit failure mode; load at post limit state.

W układach konstrukcji jedno- oraz wielonawowych hal, ze względu na korzystny rozkład masy, stosuje się dźwigary o falistym środniku typu SIN ze środnikami grubości 2,0; 2,5 i 3,0 mm oraz wysokości 333 – 1500 mm. Gwarantowana przez producenta granica plastyczności stalowych falistych środników wynosi  $f_y = 235$  lub  $355$  MPa [1, 2]. Żebra wytworzone przez fałdy środnika zwiększają naprężenia krytyczne przy ścinaniu [3 ÷ 7]. Natomiast mechanizm zniszczenia przy ścinaniu, obrazujący przejście z fazy krytycznej do stanu granicznego, klasyfikowany jest jako lokalna oraz interakcyjna utrata stateczności falistego środnika [8 ÷ 10].

Zasadnym działaniem w przypadku dźwigarów o falistym środniku jest zwiększanie przedziału nośności w za-

kresie krytycznym, ograniczając zakres pokrytyczny zakończony osiągnięciem nośności granicznej. Z punktu widzenia projektowego jest to podejście wyczerpujące problem nośności, ale otwarte pozostaje pytanie, jak wygląda obszar zniszczenia pogranicznego w przypadku działania długotrwałego obciążenia. Jak wówczas zachowuje się konstrukcja wykonana z dźwigarów o falistym środniku?

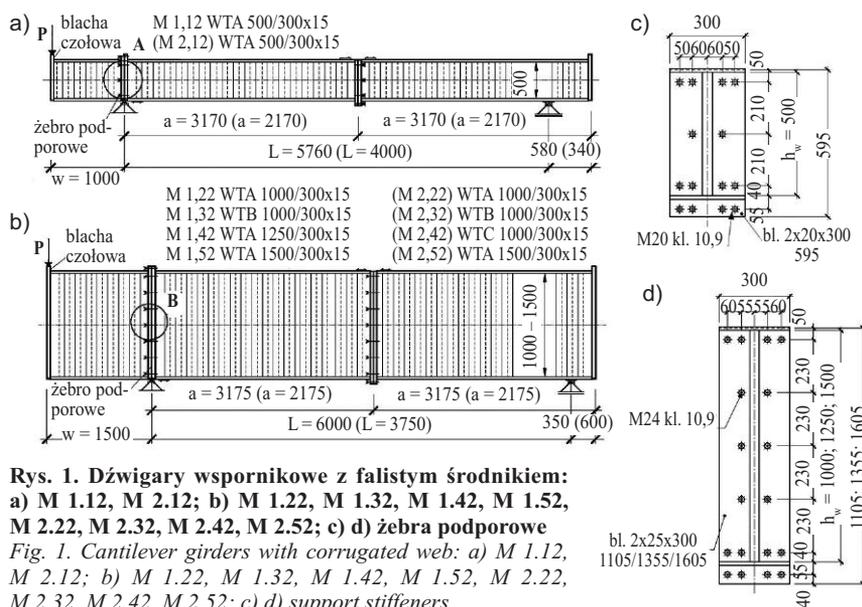
W artykule przedstawiono analizę badań nośności postaciowej falistego środnika wspornikowych dźwigarów SIN z żebrami podporowymi ze szczególnym uwzględnieniem zniszczenia w obszarze pogranicznym. Pokazano wielkość przedziałów do osiągnięcia nośności granicznej oraz zachowanie w zakresie pogranicznym. Przeanalizowano postacie zniszczenia dźwigarów oraz ścieżki równowagi statycznej wraz z ich bezpośrednim wpływem na formę zachowania w zakresie pogranicznym. Badania doświadczalne przeprowadzono na dziesięciu dźwigarach o wysokości

środnika 500, 1000, 1250 i 1500 mm. Dźwigary o schemacie statycznym belki swobodnie podpartej z jednostronnym wspornikiem zbudowano z elementów wyprodukowanych w fabryce z przeznaczeniem na rynek, połączonych doczołowo na śruby sprężone.

### Badania doświadczalne

Badania doświadczalne służące do analizy zniszczenia w stanie pogranicznym przeprowadzono na dziesięciu dźwigarach z żebrami podporowymi o schemacie statycznym belki swobodnie podpartej z jednostronnym wspornikiem (rysunek 1). Dźwigary z falistym środnikiem zostały wykonane i zaprojektowane zgodnie z literaturą i normami [11, 12]. Dźwigary złożono z różnych elementów wykonanych w wytwórni (tabela). Pomiędzy elementami dźwigarów wykonano połączenia doczołowe na śruby sprężające M20 ( $h_w = 500$  mm) oraz M 24 kl. 10,9 ( $h_w = 1000$  do 1500 mm) o nośności

<sup>1)</sup> Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa; witold.basinski@polsl.pl



**Rys. 1. Dźwigary wspornikowe z falistym środnikiem:**  
 a) M 1.12, M 2.12; b) M 1.22, M 1.32, M 1.42, M 1.52, M 2.22, M 2.32, M 2.42, M 2.52; c) d) zębra podporowe  
 Fig. 1. Cantilever girders with corrugated web: a) M 1.12, M 2.12; b) M 1.22, M 1.32, M 1.42, M 1.52, M 2.22, M 2.32, M 2.42, M 2.52; c) d) support stiffeners

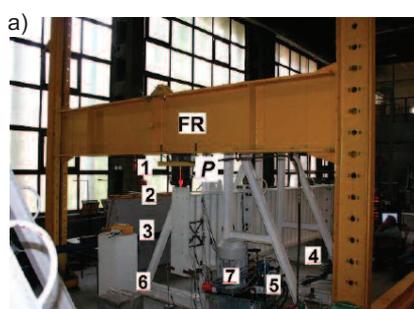
### Wyniki badań

#### Experimental results

Dźwigar	Środnik $h_w \times t_w$ [mm]	Pas [mm]	Postać zniszczenia	Obciążenie graniczne $P_{u,Rd}$ [kN]	Obciążenie krytyczne $P_{eB}$ [kN]	Obciążenie uformowania krzyżulca rozciągającego $P_{KR}$ [kN]	$P_{KR}/P_{u,Rd}$ [%]	$P_{KR}/P_{eB}$ [%]
M 1.12	500 x 2	300 x 15	L	184	147	124	0,67	0,84
M 2.12	500 x 2	300 x 15	L	181	151	113	0,62	0,75
M 1.22	1000 x 2	300 x 15	I	342	298	149	0,44	0,50
M 2.22	1000 x 2	300 x 15	L	343	296	152	0,44	0,51
M 1.32	1000 x 2,6	300 x 20	I	478	380	260	0,54	0,68
M 2.32	1000 x 2,6	300 x 15	I	492	390	280	0,57	0,72
M 2.42	1000 x 3	300 x 15	I	694	510	382	0,55	0,75
M 1.42	1250 x 2	300 x 15	I	348	304	154	0,44	0,51
M 1.52	1500 x 2	300 x 15	I	468	400	183	0,39	0,46
M 2.52	1500 x 2	300 x 15	I	459	399	180	0,39	0,45

większej od nośności dźwigarów. W połączeniach zastosowano blachy czołowe o grubości 2 x 20 mm ( $h_w = 500$  mm) oraz 2 x 25 mm ( $h_w = 1000$  do 1500 mm) połączone na spoiny pachwinowe ze środnikiem oraz z pasami. Środniki dźwigarów wykonano wg danych producenta ze stali o gwarantowanej granicy plastyczności  $f_y = 235$  MPa, natomiast pasy ze stali S 275, co potwierdzono badaniami materiałowymi [2].

Dźwigary usytuowano na stanowisku badawczym (rysunek 2). Obciążenie przekazywano z ramy (FR) za pomocą siłownika (1) o zakresie 0 – 2000 kN i maksymalnym wysuwie tłoczyska 150 mm na podkładkę (2) o grubości 25 mm w postaci siły skupionej P, którą przyłożono do blachy czołowej odcinka wspornikowego dźwigara (3) na powierzchni 40 ( $h_w = 500$  mm) lub 50 cm<sup>2</sup>



**Rys. 2. Dźwigar M 1.32: a) stanowisko badawcze (objaśnienia w tekście); b) schemat**  
 Fig. 2. Girder M 1.32: a) the test stand (explanation in text); b) scheme

( $h_w = 1000$  do 1500 mm). Zarówno część przeszłową, jak i wspornik dźwigarów zabezpieczono przed zwichrzeniem przez podpory boczne (4).

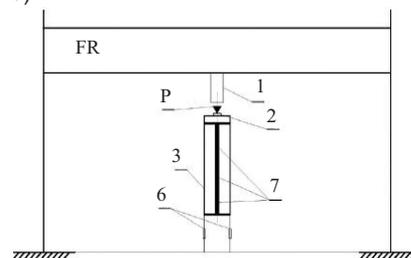
W badaniach mierzono: reakcję V wynikającą z przyłożonego obciążenia za pomocą siłomierzy typu CT (5) od obciążenia P; całkowite ugięcia y części wspornikowej dźwigara za po-

moą pary czujników indukcyjnych (6) typu PSX 200 o zakresie pomiarowym 0 – 200 mm; odrywanie podpory skrajnej oraz odkształcenia falistego środnika za pomocą układu tensometrów foliowych typu RL 10/120 o oporności 120  $\Omega$  i długości 10 mm. Obciążenie P dźwigarów zwiększano równomiernie co 2 kN do osiągnięcia nieliniowych przemieszczeń, a następnie zmniejszono skok obciążenia do 1 kN aż do osiągnięcia wartości granicznej. Prędkość obciążenia wynosiła do 20 kN/min. Po osiągnięciu wartości granicznej i spadku obciążenia nadal je kontynuowano, aż do wytworzenia krzyżulca rozciągającego na przekątnej wspornika i ustabilizowania. Należy podkreślić, że obciążenie P oraz odkształcenie falistego środnika  $\epsilon$  zapisywano w pomiarze ciągłym.

### Analiza zniszczenia

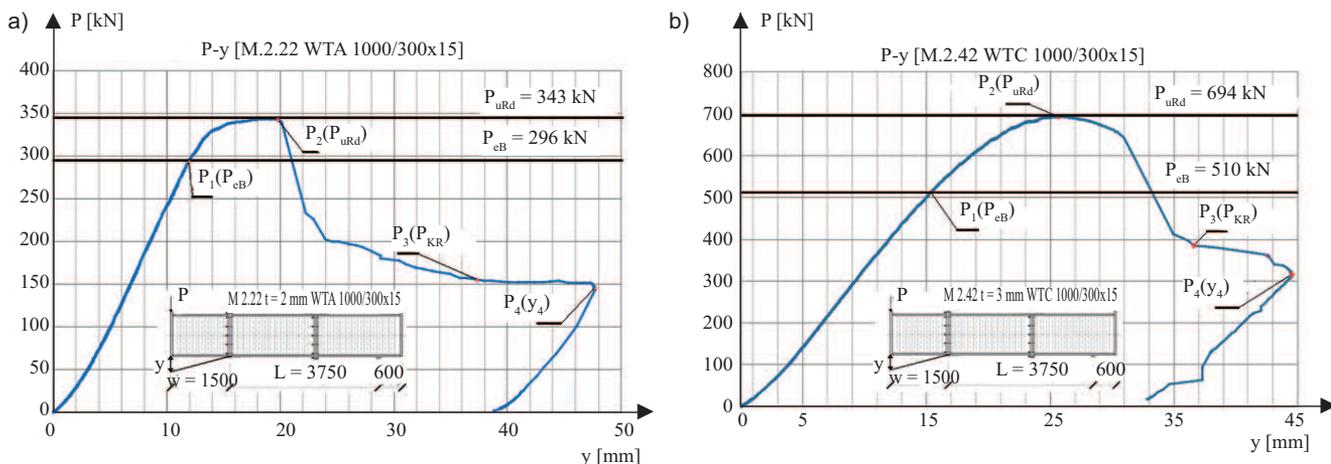
**Ścieżki równowagi statycznej P(y) dźwigarów.** Na podstawie przemieszczenia y, zmierzonego na końcu wspornika dźwigarów, sporządzono ścieżki równowagi statycznej SRS P(y) badanych dźwigarów. Na rysunku 3 pokazano SRS P(y) dźwigarów M 2.22 i M 2.42 z zębem podporowym 2 x 25 x 300 mm. Oznaczone na SRS P(y) dźwigarów (rysunek 3) współrzędne charakterystyczne dotyczą:

- $P_1(P_{eB})$  – obciążenia krytycznego dźwigara odpowiadającego najmniej-

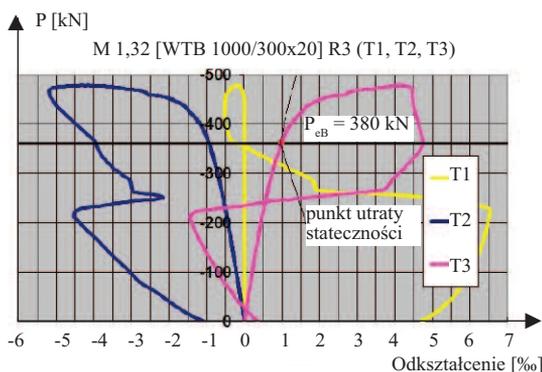


szemu liniowemu obciążeniu wyboecznemu  $P_{eB}$  przyjętemu w punkcie końca liniowego charakteru zależności obciążenia od odkształcenia P( $\epsilon$ ) (rysunek 4);

- $P_2(P_{u,Rd})$  – obciążenia granicznego z warunku zniszczenia dźwigara  $P_{u,Rd}$ , związanego ze zniszczeniem falistego środnika;



Rys. 3. Ścieżki równowagi statycznej  $P(y)$  dźwigarów: a) M 2.22; b) M 2.42  
Fig. 3. Load – displacements paths  $P(y)$  of girders: a) M 2.22; b) M 2.42



Rys. 4. Odształcenia środnika falistego w dźwigarze M 1.32  
Fig. 4. Strains of the corrugated web in girder M 1.32

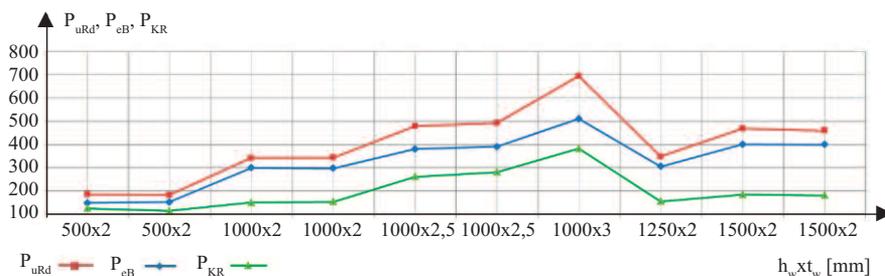
•  $P_3(P_{KR})$  – obciążenia dźwigara odpowiadającego uformowaniu krzyżulca rozciąganego na przekątnej obramowania środnika oraz  $P_4(y_4)$  (odciążenie dźwigara).

Punkt  $P_1(P_{eB})$  rozdziela liniowy przedział przemieszczeń od wpływu momentów zginających i sił poprzecznych. We wszystkich dźwigarach początek utraty stateczności środnika występuje przy odkształceniu nieprzekraczającym 1,1%. Po jego przekroczeniu występuje bardzo duże nasilenie wpływu sprężysto-plastycznych przemieszczeń postaciowych, co powoduje powstanie ukośnych załomów w falistym środniku. Wpływa to na zwiększenie przemieszczeń wsporników. Nośność graniczną dźwigary wspornikowe osiągają w punkcie  $P_2(P_{uRd})$ , który zamyka przedział odkształceń sprężysto-plastycznych  $P_1(P_{eB}) - P_2(P_{uRd})$ . Następnie występuje zmniejszenie obciążenia względem przemieszczenia. Dalsze generowanie obciążenia, po spadku obciążenia

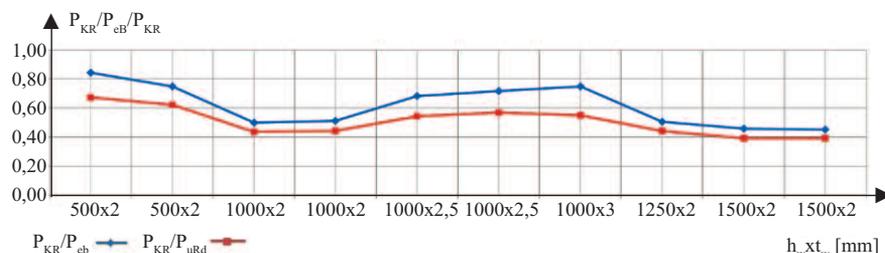
przez zamocowany siłownik (1), powoduje wytworzenie na przekątnej obramowania środnika krzyżulca rozciąganego, a następnie ustalenie obciążenia na poziomie  $P_3(P_{KR})$  aż do punktu odciążenia dźwigara  $P_4(y_4)$ . Należy podkreślić, że obciążenie  $P_{KR}$  nie zwiększa się po okresie stabilizacji, a więc nie wytwarza się faza wzmocnienia. W tabeli zestawiono wyniki badań doświadczalnych dźwigarów.

**Analiza obciążenia odpowiadającego formowaniu krzyżulca rozciągane-**

go. Na rysunku 5 zobrazowano wielkość obciążenia dźwigara odpowiadającego uformowaniu krzyżulca rozciąganego na przekątnej obramowania środnika na tle obciążenia granicznego i krytycznego. Jak łatwo zauważyć, obciążenie odpowiadające uformowaniu krzyżulca rozciąganego podąża za obciążeniem krytycznym oraz granicznym i jest do niego wprost proporcjonalne. Analizując relację obciążenia uformowania krzyżulca rozciąganego  $P_{KR}$  do obciążenia granicznego  $P_{uRd}$  i krytycznego  $P_{eB}$  stwierdzono, że jest ono zależne od smukłości środnika falistego, dlatego też na rysunku 6 przedstawiono wielkość



Rys. 5. Obciążenie uformowania krzyżulca rozciąganego  $P_{KR}$ , graniczne  $P_{uRd}$  i krytyczne  $P_{eB}$  dźwigarów  
Fig. 5. Load on the formation of a tension diagonal  $P_{KR}$ , limit  $P_{uRd}$  and critical  $P_{eB}$  of girders



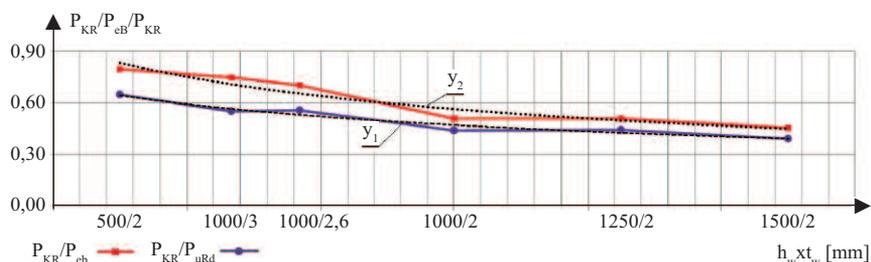
Rys. 6. Relacja obciążenia  $P_{KR}$  do obciążenia granicznego  $P_{uRd}$  i krytycznego  $P_{eB}$  dźwigarów  
Fig. 6. The ratio of load  $P_{KR}$  to load  $P_{uRd}$  and critical  $P_{eB}$  of girders

stosunku obciążenia dźwigara odpowiadającego uformowaniu krzyżulca rozciąganego na przekątnej obramowania środka do obciążenia granicznego i krytycznego w funkcji smukłości środka.

Z analizy stosunku obciążenia uformowania krzyżulca rozciąganego do obciążenia granicznego i krytycznego wynika, że zmiana zachodzi zgodnie ze zmianą smukłości środka. Im bardziej smukły środek, tym obciążenie towarzyszące uformowaniu krzyżulca rozciąganego stabilizuje się na mniejszym poziomie odniesienia w porównaniu z obciążeniem granicznym i krytycznym, poczynając od 0,65 (średnia w przypadku dwóch dźwigarów), a na wartości obciążenia granicznego 0,39 kończąc. Na rysunku 7 pokazano ponadto krzywe regresji relacji obciążenia  $P_{KR}$  odpowiednio w stosunku do obciążenia granicznego ( $y_1$ ) i krytycznego ( $y_2$ ) w funkcji smukłości środka:

$$y_1 = 7,7623x^{-0,451} \quad (1)$$

$$y_2 = 18,636x^{-0,563} \quad (2)$$



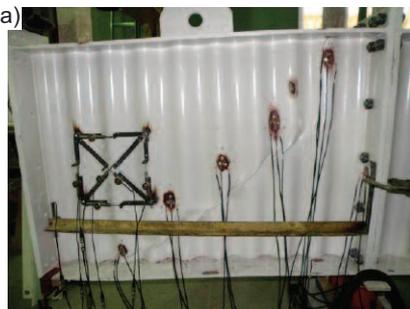
Rys. 7. Relacja obciążenia  $P_{KR}$  do obciążenia granicznego  $P_{uRd}$  i krytycznego  $P_{eB}$  dźwigarów  
Fig. 7. The ratio of load  $P_{KR}$  to load  $P_{uRd}$  and critical  $P_{eB}$  of girders

Umożliwiają one bezpośrednie wyznaczenie wartości obciążenia PKR odpowiadającego uformowaniu krzyżulca rozciąganego dla każdego typu dźwigara na podstawie parametrów środka.

**Formy zniszczenia pogranicznego dźwigarów.** Proces zniszczenia dźwigarów o falistym środku przy ścinaniu rozpoczyna się od utraty stateczności falistego środka. Rozróżniamy zniszczenie dźwigara spowodowane lokalną utratą stateczności środka, która prowadzi ostatecznie do obciążenia pasów siłą poprzeczną, a następnie ich załamania w płaszczyźnie dźwigara w punkcie nośności granicznej. Drugi typ zniszczenia wywołany jest interakcyjną utratą stateczności środka, w przypadku której kilka lokalnych ognisk wybo-

nia środka inicjuje globalną postać utraty stateczności, prowadząc w fazie końcowej do załamania pasów w płaszczyźnie dźwigara [10].

W przedstawionych badaniach dźwigarów wspornikowych zniszczenie środka wystąpiło w obszarze obciążenia stałą siłą poprzeczną (fotografia 1). W dźwigarach o  $h_w = 500$  mm oraz dźwigarze M 2.22 ( $h_w = 1000$  mm,  $t_w = 2$  mm) zniszczenie zostało wywołane lokalną utratą stateczności środka L (fotografia 1a). W pozostałych dźwigarach postać zniszczenia została spowodowa-

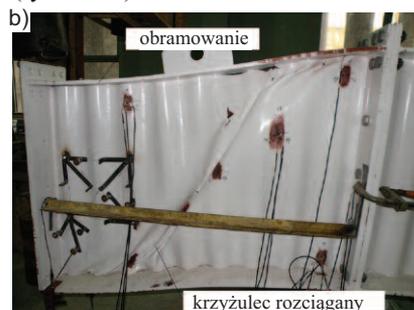


szego działania obciążenia rozpoczyna się proces formowania krzyżulca rozciąganego w środku łączącego skrajne punkty obramowania (fotografia 2). Dotyczy to dźwigarów, w których proces zniszczenia środka został wywołany lokalną i interakcyjną utratą jego stateczności. Następnie obciążenie stabilizuje się na poziomie 0,39 – 0,67 nośności granicznej. Z kolei istotną różnicą po uformowaniu krzyżulca rozciąganego w dźwigarach o różnym procesie inicjacji zniszczenia środka jest stan spoin łączących środek z pasami.

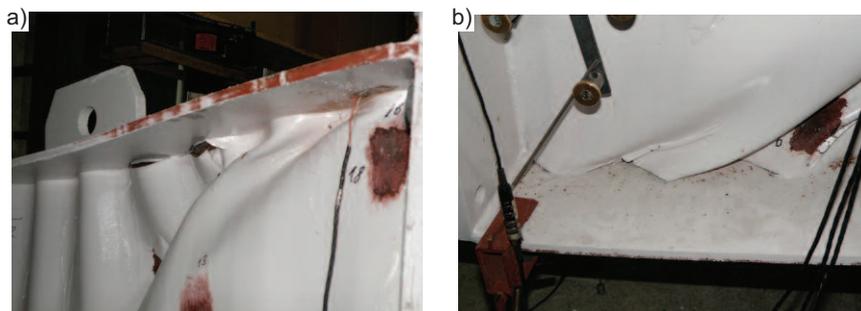


Fot. 1. Zniszczenie pod obciążeniem granicznym dźwigarów: a) M 2.22; b) M 2.42  
Photo 1. Failure mode under limit load of girders: a) M 2.22; b) M 2.42

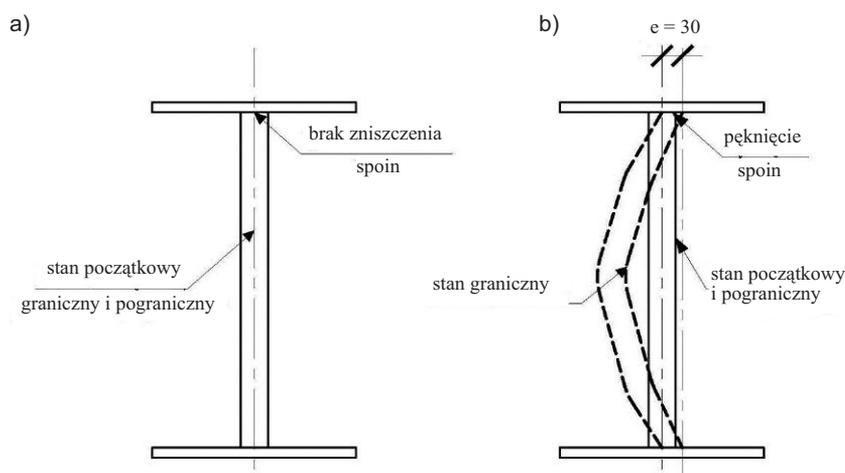
W przypadku procesu wywołanego lokalną utratą stateczności spoiny pozostały nienaruszone, dlatego też występowała pełna stabilizacja obciążenia po uformowaniu krzyżulca. Natomiast w dźwigarach, których proces zniszczenia został zainicjowany interakcyjną utratą stateczności środka, wystąpiło zniszczenie spoin łączących środek z pasami (fotografia 3). Zostało to wywołane dodatkowym obciążeniem spoin momentem zginającym  $M$ , wynikłym z powstałego mimośrodowego przesunięcia środka po wyboczeniu względem osi spoin łączących pasy. Podczas formowania krzyżulca rozciąganego ponowne „prostowanie” wybozonego środka skutkowało pękaniem spoin (rysunek 8).



Fot. 2. Zniszczenie pograniczne dźwigarów: a) M 2.22; b) M 2.42  
Photo 2. Failure mode after limit load of girders: a) M 2.22; b) M 2.42



Fot. 3. Zniszczenie pograniczne dźwigarów: a) M 2.22; b) M 2.42  
Photo 3. Failure mode after limit load of girders: a) M 2.22; b) M 2.42



Rys. 8. Mechanizm zniszczenia spoin dźwigarów: a) lokalna inicjacja zniszczenia; b) interakcyjna inicjacja zniszczenia  
Fig. 8. Mechanism of girder weld failure: a) local initiation of failure; b) interactive initiation of failure

Należy dodać, że w przykładowym dźwigarze M 2.42 wyężenie jednostronnej spoiny, łączącej środnik z pasem, wynosiło w stanie granicznym nośności 78% [13]. Natomiast uwzględniając dodatkowy wpływ momentu zginającego w stanie pogranicznym przekraczało ponad pięciokrotnie dopuszczalną nośność spoin.

## Wnioski

Dźwigary o falistym środniku obramowane pasem oraz żebrami są ustrojami wewnątrz statycznie niewyznaczalnymi. W dźwigarach niskich o wysokości środnika  $h_w = 500$  mm proces zniszczenia inicjowany jest przez lokalną utratę stateczności środnika. W dźwigarach o wysokości środnika od  $h_w = 1000$  mm proces zniszczenia wywołany jest powiązaną wzajemnie lokalną i globalną utratą stateczności środnika (interakcyjną). W dźwigarach o wysokości  $h_w = 1000$  mm przy grubości środnika  $t_w = 2$  mm zniszczenie mo-

że inicjować zarówno lokalna, jak i interakcyjna postać utraty stateczności.

Po osiągnięciu nośności granicznej, w wyniku dalszego działania obciążenia, rozpoczyna się proces formowania krzyżulca rozciąganego w środniku łączącego skrajne punkty obramowania. Proces kończy się ustabilizowaniem obciążenia na poziomie 0,39 – 0,67 nośności granicznej. Wartość obciążenia PKR jest zależna od smukłości środnika. Im bardziej smukły środnik, tym obciążenie towarzyszące uformowaniu krzyżulca rozciąganego w stanie pogranicznym stabilizuje się na niższym poziomie odniesienia w porównaniu z obciążeniem granicznym i krytycznym. Obciążenie PKR odpowiadające uformowaniu krzyżulca rozciąganego daje jednocześnie obraz możliwości pracy konstrukcji z dźwigarów SIN w sytuacji awaryjnej.

Uformowanie krzyżulca rozciąganego w przypadku dźwigarów, w których proces zniszczenia został wywołany lo-

kalną utratą stateczności, zamyka obraz zniszczenia pogranicznego, a spoiny łączące środnik z pasami pozostają nienaruszone. Natomiast w dźwigarach, których proces zniszczenia został zainicjowany interakcyjną utratą stateczności środnika, po uformowaniu krzyżulca następuje w etapie końcowym zniszczenie spoin łączących środnik z pasami. Proces zniszczenia wywołany interakcyjną utratą stateczności środnika zarówno w stanie przed, jak i pogranicznym jest bardziej gwałtowny, niż wywołany lokalną utratą stateczności. Pozostawia zatem krótszy czas na reakcję w momencie zaistnienia stanu awaryjnego konstrukcji o falistym środniku.

## Literatura

- [1] Mendera Z, Kuchta K. Profile z falistym środnikiem SIN. 2002. Zasady wymiarowania. Politechnika Krakowska. Kraków 2002.
- [2] Basiński W, Kowal Z. Random strength parameters of steel corrugated webs and their influence on the resistance of SIN plate girders. Architecture Civil Engineering, Environment. 2018; <https://doi.org/10.21307/ACEE-2018-039>.
- [3] Easley JT. Buckling formulas for corrugated metal shear diaphragms. Journal of the Structural Division. SECF ST7 1975: 1403–17.
- [4] Kuchta K. Nośność i sztywność blachownic o falistych środnikach. Praca doktorska, Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej, Kraków 2004.
- [5] Rutecki J. Cienkościenne konstrukcje nośne. Obliczenia wytrzymałościowe. PWN, Warszawa 1966.
- [6] Elgaaly M, Hamilton RW, Seshadri A. Shear strength of beams with corrugated webs. Journal of Structural Engineering. 1996; 122(4): 390–8.
- [7] Pasternak H, Kubieniec G. Plate girders with corrugated webs. Journal of Civil Engineering and Management. 2010; 1doi:10.3846/jcem.2010.17.
- [8] Hamilton RW. Behavior of welded girder with corrugated webs. Ph.D. thesis. University of Maine; 1993.
- [9] Eldib MEA.-H. Shear buckling strength and design of curved corrugated steel webs for bridges. Journal of Constructional Steel Research. 2009; 65: 2129–2139.
- [10] Basiński W. 2019. Post buckling resistance reserve of corrugated girders with support stiffeners. Archives of Civil Engineering. 2022. DOI: 10.24425/ace.2022.143052.
- [11] PN-EN 1993-1-1:2003. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [12] PN-EN 1993-1-5:2008. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-5: Blachownice.
- [13] PN-EN 1993-1-8: 2008. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-8: projektowanie węzłów.

Przyjęto do druku: 08.01.2024 r.