

dr inż. Krzysztof Śledziewski^{1)*}

ORCID: 0000-0003-3022-8105

dr inż. Marcin Górecki¹⁾

ORCID: 0000-0001-8746-8172

Eksperymentalna nośność na ścinanie blachownic z falistym środkiem o różnym typie fali

Experimental shear resistance of plate girders with a corrugated web of different wave types

DOI: 10.15199/33.2023.09.05

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych wykonanych na belkach ze środkami z blachy fałdowej o różnym profilu sinusoidalnym poddanych działaniu czteropunktowego zginania. Przeprowadzone badania wykazały, że kształt fali ma znaczny wpływ na nośność na ścinanie belek dwuteowych ze środkiem sinusoidalnym. Uzyskane wyniki odniesiono również do wyznaczonej nośności normowej, która była na niższym poziomie, niż wynika to z badań doświadczalnych.

Słowa kluczowe: środek sinusoidalny; nośność na ścinanie; nośność normowa; badania eksperymetalne.

Abstract. This paper presents the results of laboratory tests performed on beams with corrugated plate webs of different sinusoidal profiles subjected to four-point bending. The conducted tests showed that the parameters of the waveform have a significant effect on the shear strength of I-beams with sinusoidal webs. The obtained results were also related to the determined norm load capacities, which were at a lower level than the experimental results.

Keywords: sinusoidal web; shear strength; standard load capacities; experimental studies.

O d wielu lat blachownice stosowane są jako główne elementy nośne w konstrukcjach mostowych oraz w konstrukcjach przemysłowych. W przekroju poprzecznym typowy dźwigar blachownicowy składa się z dwóch równoległych półek i płaskiego środka, na który przypada 30 – 40% całego ciężaru. Ekonomiczne projektowanie belek wymaga zwykle stosowania smukłych środków, tj. elementów o niewielkiej grubości w stosunku do wysokości oraz długości. W sytuacji, gdy środek jest jednak wyjątkowo cienki, może wystąpić utrata stateczności miejscowej przekroju. Należy wówczas zwiększyć grubość środka lub zastosować poprzeczne i/lub podłużne żebra, których zadaniem jest zapewnienie sztywności elementu podpieranego. W celu uniknięcia problemu utraty stateczności miejscowej środka w ostatnim czasie zaczęto stosować na szerszą skalę środki wykonane z wyprofilowanych blach fałdowych [1 – 5]. W produkcji belek ze środkami fałdowymi wykorzystywane są zarówno środki

z blach trapezowych [6, 7], jak i sinusoidalnych. Badania naukowe prowadzone są jednak przede wszystkim na belkach ze środkami z blach trapezowych. Niezależnie od blachy zastosowanej na środek udowodniono, że udział środka w przenoszeniu naprężeń normalnych jest niewielki [8 – 12]. Potwierdziły to również nasze badania [13 – 15]. Natomiast badania nośności na ścinanie [16 – 22] wykazały, że zapewnia ją tylko środek. W konsekwencji interakcja pomiędzy momentem zginającym a siłą ścinającą może być pominięta przy określaniu nośności na ścinanie [23 – 25]. Wynika z tego, że pracę blachownic o środku falistym można porównać do pracy kratownicy. Wytyczne dotyczące określenia nośności takich belek zawarte są w dokumentach europejskich [26, 27], bazujących na modelu kratownicowym pracy blachownicy.

W artykule przedstawiono wybrane wyniki badań laboratoryjnych jednoprzęsłowych stalowych belek dwuteowych wyposażonych w środki z blachy falistej. Ich głównym celem było doświadczalne określenie zależności pomiędzy kształtem fali a nośnością na ścinanie dźwigarów ze środkami

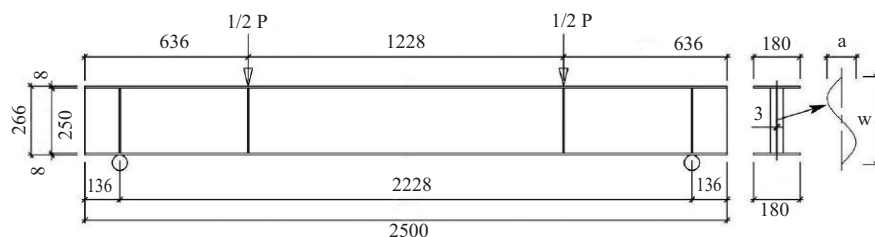
o profilu sinusoidalnym oraz analiza porównawcza z wyznaczonymi nośnościami normowymi na podstawie załącznika D normy PN-EN 1993-1-5 [27].

Badania laboratoryjne

Wpływ typu fali środka falistego na nośność na ścinanie stalowej blachownicy został określony doświadczalnie na podstawie badań laboratoryjnych trzech elementów próbnych [28]. Każda blachownica miała długość całkowitą 2500 mm, w tym rozpiętość podporową 2228 mm. Pas dolny i górny wykonano z blachy płaskiej grubości 8 mm i szerokości 180 mm. Wmiejscu podparcia oraz przyłożenia obciążenia zewnętrznego zlokalizowane były żebra poprzeczne, na pełnej wysokości z blach płaskich, grubości 5 mm i zmiennej szerokości w zależności od typu środka. Całkowita wysokość każdej blachownicy wynosiła 266 mm, w tym środek miał wysokość 250 mm i grubość 3 mm. Poszczególne elementy składowe blachownicy połączone ze sobą za pomocą spoin pachwinowych dwustronnych grubości 4 mm. Na rysunku 1 przedstawiono geometrię badanych belek oraz sposób i lokalizację przyłożonego obciążenia zewnętrznego.

¹⁾ Politechnika Lubelska, Wydział Budownictwa i Architektury

^{*)} Adres do korespondencji: k.sledziewski@pollub.pl



Rys. 1. Geometria badanych belek wraz z lokalizacją przyłożonego obciążenia

Fig 1. Geometry of tested beam along with the location of the load application

Rozpatrywane układy miały różny przebieg środków z blachy falistej (rysunek 1), różniący się amplitudą fali (a) oraz jej okresem (w). W tabeli 1 zestawiono parametry geometryczne środków wykorzystanych w badaniach.

Tabela 1. Parametry geometryczne środków badanych doświadczalnie

Table 1. Geometric parameters of the webs tested experimentally

Element badawczy	a [mm]	w [mm]	a/w [-]
BS 155	43	155	0,277
BS 200	50	200	0,250
BS 381	140	381	0,367

Wszystkie elementy składowe każdej z blachownic zostały wykonane ze stali S355 o nominalnej granicy plastyczności 355 MPa. W celu wyznaczenia dokładnych parametrów materiałowych przeprowadzono dodatkowe badania wytrzymałości stali na próbkach pobranych z fragmentów belek, które nie uległy nadmiernemu wyciężeniu podczas badań zasadniczych. Pasy wszystkich belek zostały wykonane z blachy pochodzącej z jednej dostawy, w związku z tym próbki pobrano tylko z jednej belki. Tarcze ze środków belek do przygotowania próbek pochodziły z odcinków, w których krzywizna sinusoidy była najbardziej zbliżona do odcinka prostego, czyli z tzw. zerowego przebiegu fali.

Wymiary próbek oraz badania statycznej próby rozciągania były zgodne z normą [29]. W tabeli 2 zestawiono właściwości mechaniczne stali, tj. wytrzymałość na rozciąganie (f_u) i moduł sprężystości podłużnej (E) wyznaczony za pomocą ekstensometru.

Badania niszczące dźwigarów oraz uzupełniające badania materiałowe przeprowadzono w akredytowanym Laboratorium Budownictwa będącym jednostką Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Lubelskiej. Przyję-

Tabela 2. Cechy materiałowe stali dźwigarów
Table 2. Material characteristics of girder steels

Miejsce pobrania próbki	Element badawczy	f_u [MP]	E [GPa]
Środek	BS 155	486,80	204,26
Środek	BS 200	509,21	197,82
Środek	BS 381	460,39	199,81
Pas	BS 155	443,94	180,45

ty program badań zakładał badanie belek w schemacie czteropunktowego zginania (rysunek 1, fotografia 1). Pozwoliło to na analizę zachowania belek pod obciążeniem wywołującym siły wewnętrzne o stałej wartości momentu zginającego w centralnej części belki i stałej wartości siły poprzecznej w strefie przypodporowej.

Jedna z podpór wykonana była jako przegubowo nieprzesuwna, natomiast druga jako przegubowo przesuwna. Siły obciążające przykładano w odległości 636 mm od każdego z końców blachownicy. Odległość pomiędzy nimi i zarazem długość belki, na której wartość momentu zginającego była stała, wynosiła 1228 mm. Obciążenie zewnętrzne realizowano za pomocą jed-

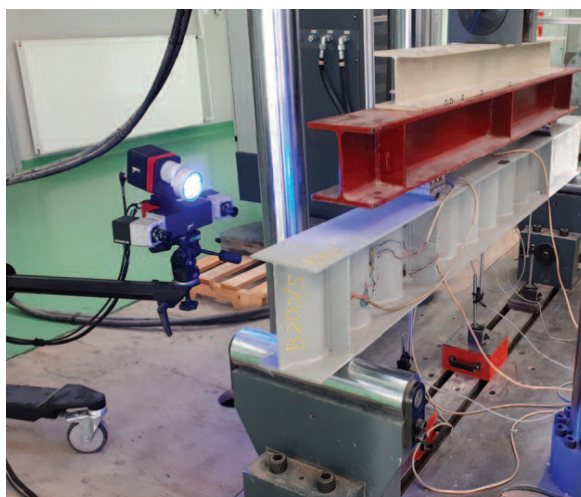
nego siłownika oraz belek trawersowych umożliwiających wywołanie dwóch sił skupionych. Dodatkowo siły były przyłożone do pasa górnego blachownicy za pośrednictwem półwałki stalowego rozkładającego siły skupione na obciążenie liniowe usytuowane poprzecznie do osi belki.

Proces obciążania odbywał się w cyklach „obciążenie – odciążenie”. W każdym kolejnym cyklu siła wzrastała o 50 kN aż do zniszczenia. Po uzyskaniu wartości minimalnej lub maksymalnej obciążenia w każdym cyklu, siłę utrzymywano na stałym poziomie przez ok. 180 s. W tym czasie rejestrowano odczyty z urządzeń pomiarowych i obserwowano zmiany zachodzące podczas badania elementów próbnych. Ponadto wykonano pomiar przemieszczeń pionowych elementów badawczych w trzech punktach za pomocą czujników indukcyjnych (fotografia 2). Punkty pomiarowe znajdowały się na spodniej stronie pasa dolnego bezpośrednio pod siłami (czujniki LVDT-1 i LVDT-2) i w środku rozpiętości belki (LVDT-3). Głównym obszarem badań był środek w strefie przypodporowej (występowanie sił ścinających).

Wyniki badań

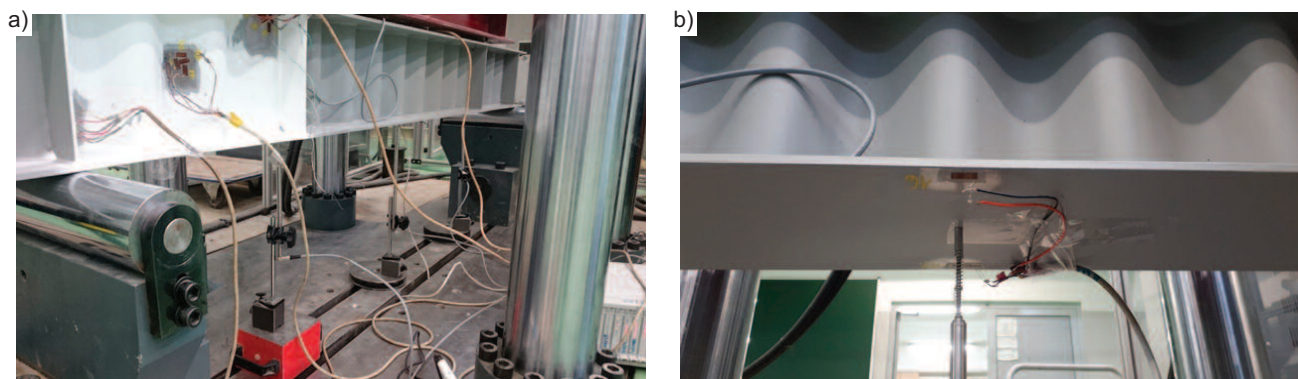
Na rysunku 2 przedstawiono ścieżki równowagi statycznej $P(y)$ elementów badawczych uzyskane podczas badań. Przemieszczenie globalne y odczytywano w środku rozpiętości belek (czujnik LVDT-3). W zakresie sprężystym, belki wykazywały zbieżność przemieszczenia

pionowego w centralnej ich części. W końcowej fazie zakresu sprężystego pojawiły się rozbieżności, które zwiększały się wraz ze wzrostem obciążenia. Wyraźna nieliniowość krzywej $P(y)$ przemieszczenia globalnego występuje od momentu pojawienia się pierwszych zmian geometrycznego kształtu fali, które sygnalizują początek utraty stateczności falistego środnika i trwa do momentu zniszczenia dźwigara

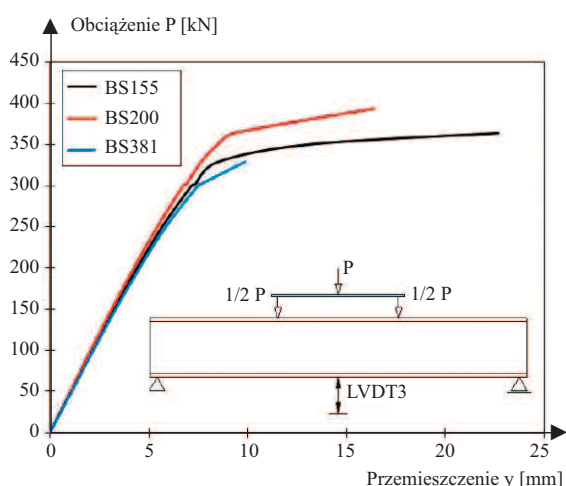


Fot. 1. Element próbny na stanowisku badawczym

Photo 1. Test sample on the test stand



Fot. 2. Lokalizacja czujników przemieszczeń: a) na długości belki; b) w przekroju poprzecznym
Photo 2. Location of displacement sensors: a) along the length of the beam; b) in the cross-section



Rys. 2. Ścieżki równowagi statycznej $P(y)$ badanych dźwigarów
Fig. 2. Load-displacement paths $P(y)$ experimental girders

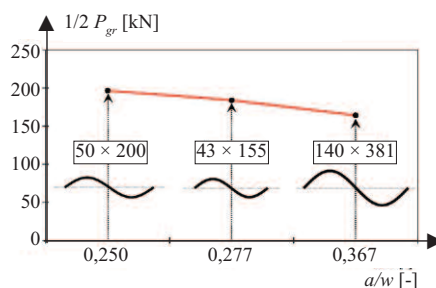
(nośność graniczna – P_{gr}) sygnalizowanego zakończeniu formowania się załomu plastycznego. Zjawisko to potwierdziły również postacie zniszczenia uzyskane podczas badań. Główną przyczyną uszkodzenia każdego elementu badawczego była utrata stateczności falistego środnika. Proces utraty stateczności rozpoczynał się od powstawania ognisk lokalnej utraty stateczności na odcinkach prostych pomiędzy fałdami. Lokalne ognisko wybożenia doprowadzało do powstawania linii załomów plastycznych zbliżających się do pasów górnych. W konsekwencji następowało załamanie pasów w płaszczyźnie belki w wyniku natychmiastowego ich obciążenia siłą poprzeczną.

Analizując otrzymane wyniki badań stwierdzono, że czynnikiem wpływającym na zakres nośności nadkrytycznej jest amplituda fali. Im większa amplituda, tym mniejszy zakres, dlatego też

największym zakresem charakteryzowała się belka BS 155, a najmniejszym belka BS 381. Ze względu na nieodwracalny proces utraty stateczności falistego środnika, obszar nośności po przekroczeniu obciążenia krytycznego nie nadaje się do wykorzystania w eksploatacji konstrukcji. Natomiast z punktu widzenia bezpieczeństwa stanowi zabezpieczenie przed katastrofą w postaci tzw. przystanku plastycznego [30]. W przypadku środników o profilu

sinusoidalnym parametry przebiegu fali wpływają również na wielkość obciążenia granicznego (P_{gr}). Na rysunku 3 przedstawiono zmianę wartości siły ścinającej ($\frac{1}{2} P_{gr}$) w chwili zniszczenia dźwigarów w funkcji amplitudy i okresu fali (a/w).

Największą wartość siły ścinającej $\frac{1}{2} P_{gr} = 196,52$ kN odnotowano w przypadku belki BS 200, która charakteryzuje się najmniejszym wskaźnikiem a/w .



Rys. 3. Zmiana wartości siły ścinającej ($\frac{1}{2} P_{gr}$) w funkcji kształtu środnika (a/w)
Fig. 3. Variation of shear force ($\frac{1}{2} P_{gr}$) as a function of web shape (a/w)

Z kolei najmniejszą wartość siły $\frac{1}{2} P_{gr} = 164,17$ kN uzyskała belka o największej wartości wskaźnika a/w – BS 381. Obecnie najczęściej stosowanym profilem sinusoidy na środniki blachownic jest profil 43×155 mm o wskaźniku a/w wynoszącym 0,277. Belka wyposażona w ten środnik uzyskała podczas badań wartość siły granicznej $\frac{1}{2} P_{gr} = 183,86$ kN. Belki ze środnikami charakteryzującymi się podobnym wskaźnikiem a/w , tj. belka BS 155 oraz belka BS 200 wykazały zbliżoną wartość siły granicznej, która była jednak nieznacznie mniejsza w przypadku belki BS 155. W tabeli 3 zestawiono porównanie względnej wartości wskaźnika a/w oraz eksperymentalnej wartości siły ścinającej $\frac{1}{2} P_{gr}$ w odniesieniu do dźwigara BS 200, który charakteryzuje się największą wartością obciążenia granicznego P_{gr} przy najmniejszym wskaźniku a/w .

Zgodnie z ogólną tendencją, wraz ze wzrostem wskaźnika a/w zmniejsza się wartość granicznej siły tnącej $\frac{1}{2} P_{gr}$ na ścinanie środników falistych. Przy czym spadek ten jest niewielki. Jak wynika z tabeli 3, przy wartości $(a/w)/BS 200$ wynoszącej 1,11 zaobserwowano spadek siły opisanej jako $(\frac{1}{2} P_{gr})/BS 200$ do wartości 0,94. Natomiast wzrost wartości $(a/w)/BS 200$ aż do 1,47 powodował zmniejszenie wartości $(\frac{1}{2} P_{gr})/BS 200$ jedynie do 0,84.

Tabela 3. Wpływ wskaźnika a/w na wartość eksperymentalnej siły ścinającej $\frac{1}{2} P_{gr}$
Table 3. Influence of a/w ratio on the value of the experimental shear load $\frac{1}{2} P_{gr}$

Belka	a/w	$(a/w)/BS 200$	$\frac{1}{2} P_{gr}/BS 200$
BS 200	0,250	1,00	1,00
BS 155	0,277	1,11	0,94
BS 381	0,367	1,47	0,84

W tabeli 4 przedstawiono porównanie wartości nośności normowej na ścinanie V_{Rd} oraz uzyskane w trakcie badań wartości granicznej siły ścinającej $\frac{1}{2} P_{gr}$ w chwili zniszczenia elementu próbnego. Nośność normową badanych dźwigarów wyznaczono na podstawie wytycznych zawartych w załączniku D normy [27].

Tabela 4. Wartość nośności normowej V_{Rd} i siły ścinającej $\frac{1}{2} P_{gr}$ uzyskanej eksperymentalnie
 Table 4. Values of standard load capacity V_{Rd} and shear force $\frac{1}{2} P_{gr}$ obtained experimentally

Belka	V_{Rd} [kN]	$\frac{1}{2} P_{gr}$ [kN]	$(\frac{1}{2} P_{gr})/V_{Rd}$ [-]
BS 155	146,61	183,86	1,25
BS 200	142,25	196,51	1,38
BS 381	138,75	164,17	1,18

Nośność na ścinanie w belkach ze środkami falistymi wg [27] uzależniona jest m.in. od utraty stateczności lokalnej lub globalnej środka. Amplituda fali blachy środka ma więc wpływ na nośność na ścinanie takiego elementu. Obliczona nośność normowa wynosiła 138,75 – 146,61 kN. Ponownie najmniejszą wartość uzyskała belka BS 381, natomiast największą BS 155. W przypadku każdego elementu próbnego wartość $\frac{1}{2} P_{gr}$ otrzymana w warunkach laboratoryjnych była znacznie większa. Analizując zależność $\frac{1}{2} P_{gr}/V_{Rd}$ można zaobserwować, że różnica ta wynosiła od 1,18 w przypadku belki BS 381 do aż 1,38 w przypadku belki BS 200.

Podsumowanie

Ideą zastosowania i główną zaletą blachy falistej jako cienkościennego środka blachownicy bez uźbrowania jest nie tylko zwiększenie sztywności środka przy jednoczesnej redukcji ciężaru, ale również zmniejszenie kosztów wykonania takich dźwigarów o 10 ÷ 30% w porównaniu z tradycyjnymi blachownicami z płaskim środkiem i o ponad 30% w porównaniu z dźwigarami z kształtowników walcowanych na gorąco [7]. Niewielka grubość blach falistych na środku wymusza precyzyjne oszacowanie nośności przy ścinaniu.

Przeprowadzone badania i analizy wykazały, że wytrzymałość na ścinanie belek dwuteowych ze środkami falistymi jest ściśle uzależniona od kształtu fali, tj. amplitudy (a) i jej okresu (w). Zarówno wzrost okresu (w), jak i wskaźnika a/w w belkach ze środkiem sinusoidalnym wpływa niekorzystnie na no-

śność takich układów. Wykonane obliczenia wykazały, że wyznaczona nośność wg normy [27] była na niższym poziomie, niż wynika to z badań doświadczalnych. W związku z tym autorzy planują dalsze badania w tym kierunku.

Fotografie: archiwum Autorów

Literatura

- [1] Elgaaly M, Seshadri A, Rodriguez R, Ibrahim S. Bridge girders with corrugated webs. *Transp. Res. Rec.* 2000; DOI: 10.3141/1696-19.
- [2] Pasternak H, Kubieniec G. Plate girders with corrugated webs. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2010; DOI: 10.3846/jcem.2010.17.
- [3] Sayed-Ahmed EY. Plate Girders with Corrugated Steel Webs, *Engineering Journal*. 2005; t. 42, nr 1: 1 – 13.
- [4] Ibrahim BSA. Steel Plate Girders with Corrugated Webs, Past Present and Future. Ain Shams University, 2015.
- [5] El Metwally A, Loov RE. Corrugated steel webs for prestressed concrete girders, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*. 2003; DOI: 10.1617/13820.
- [6] Cafolla J. Corrugated webs and Lateral Restraints in Plate Girders for Bridges. 1995; 312.
- [7] Prathebha PJHH. Corrugated web steel girders-A state of the art review, *International Journal Of Engineering Research And Development*. 2018; t. 14, nr 9: 14 – 19.
- [8] Wang S, He J, Liu Y. Shear behavior of steel I-girder with stiffened corrugated web, Part I: Experimental study, *Thin-Walled Structures*. 2018, 2019, DOI: 10.1016/j.tws.2019.02.025.
- [9] Eldib MEAH. Shear buckling strength and design of curved corrugated steel webs for bridges. *J Constr Steel Res.* 2009; DOI: 10.1016/j.jcsr.2009.07.002.
- [10] Huang L, Hikosaka H, Komine K. Simulation of accordion effect in corrugated steel web with concrete flanges, *Comput Struct*. 2004, DOI: 10.1016/j.compstruc.2003.07.010.
- [11] Elgaaly M, Seshadri A, Rodriguez R, Ibrahim S. Bridge Girders with Corrugated Webs, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2000; DOI: 10.3141/1696-19.
- [12] Yi J, Gil H, Youm K, Lee H. Interactive shear buckling behavior of trapezoidally corrugated steel webs, *Eng Struct*. 2008; DOI: 10.1016/j.engstruct.2007.11.009.
- [13] Górecki M, Pieńko M, Łagoda G. Numerical analysis of beam with sinusoidally corrugated webs, *AIP Conf Proc*. 2018; DOI: 10.1063/1.5019162.
- [14] Górecki M, Śledziwski K. Experimental Investigation of Impact Concrete Slab on the Bending Behavior of Composite Bridge Girders with Sinusoidal Steel Web, *Materials*. 2020; DOI: 10.3390/ma13020273.
- [15] Śledziwski K, Górecki M. Finite Element Analysis of the Stability of a Sinusoidal Web in Steel and Composite. *Materials*. 2020; t. 13, nr 5: 1041.

[16] Elgaaly M, Seshadri A, Hamilton RW. Bending Strength of Steel Beams with Corrugated Webs, *Journal of Structural Engineering*. 1997; DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:6(772).

[17] He J, Wang S, Liu Y, Wang D, Xin H. Shear behavior of steel I-girder with stiffened corrugated web, Part II: Numerical study, *Thin-Walled Structures*, t. 147, nr February 2019, s. 106025, 2020, DOI: 10.1016/j.tws.2019.02.023.

[18] Leblouba M, Junaid MT, Barakat S, Alto-ubab S, Maalej M. Shear buckling and stress distribution in trapezoidal web corrugated steel beams, *Thin-Walled Structures*, t. 113, nr December 2016, s. 13–26, 2017, DOI: 10.1016/j.tws.2017.01.002.

[19] Driver RG, Abbas HH, Sause R. Shear Behavior of Corrugated Web Bridge Girders. *Journal of Structural Engineering*. 2006, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445.

[20] Moon J, Yi J, Choi BH, Lee HE. Shear strength and design of trapezoidally corrugated steel webs, *J Constr Steel Res.* 2009; DOI: 10.1016/j.jcsr.2008.07.018.

[21] Hassanein MF, Elkawas AA, El Hadidy AM, Elchalakani M. Shear analysis and design of high-strength steel corrugated web girders for bridge design, *Eng Struct*. 2017, DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.05.035.

[22] Riahi F, Behraves A, Fard MY, Armaghani A. Shear Buckling Analysis of Steel Flat and Corrugated Web I-girders, *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2018, DOI: 10.1007/s12205-017-1530-9.

[23] Sayed-Ahmed EY. Plate girders with corrugated steel webs, *Engineering Journal*. 2005, DOI: 10.3846/jcem.2010.17.

[24] Kövesdi B, Jáger B, Dunai L. Bending and shear interaction behavior of girders with trapezoidally corrugated webs, *J Constr Steel Res.* 2016, DOI: 10.1016/j.jcsr.2016.03.002.

[25] Jáger B, Dunai L, Kövesdi B. Experimental investigation of the M-V-F interaction behavior of girders with trapezoidally corrugated web, *Eng Struct*. 2017, DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.12.030.

[26] DAST-Richtlinie 015, 1990, Träger mit Schlanken Stegen.

[27] PN-EN 1993-1-5:2008, Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-5: Blachownice.

[28] Górecki M, Śledziwski K. Influence of corrugated web geometry on mechanical properties of i-beam: Laboratory tests. *Materials*. 2022, DOI: 10.3390/ma15010277.

[29] PN-EN 1993-1-1:2006 Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.

[30] Basiński W. Nośność dźwigarów o falistym środku wzmocnionych żebrami podporowymi i przekątnymi. Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2020.

Badania zostały sfinansowane z programu projakościowego Politechniki Lubelskiej pt: „Granty na granty” (Grant nr 1/GnG2/2022).

Przyjęto do druku: 24.07.2023 r.