

dr hab. inż. Stanisław Kostecki, prof. PWr.<sup>1)\*</sup>

dr inż. Jan Gierczak<sup>1)</sup>

dr inż. Jerzy Machajski<sup>1)</sup>

## Ocena zagrożenia korozyjnego i przedłużenie żywności wrot wspornych śluzy żeglugowej w Brzegu Dolnym

*Evaluation of the corrosion hazard and life extension  
of Brzeg Dolny navigational lock-gate*

DOI: 10.15199/33.2015.10.12

(Studium przypadku)

**Streszczenie.** W artykule omówiono procedurę poprawy stanu technicznego wrot wspornych głowy dolnej śluzy żeglugowej w Brzegu Dolnym na rzece Odrze, zagrożonych sytuacją awaryjną. Prace obliczeniowe poprzedzono dokładną inwentaryzacją elementów stalowych konstrukcji wrot, wraz z identyfikacją ich uszkodzeń. Wyniki prac pomiarowych, badawczych oraz obliczeń numerycznych pozwoliły na wskazanie wymaganego zakresu prac naprawczych wrot wspornych, a także na wydanie orzeczenia o możliwości dalszej ich eksploatacji.

**Słowa kluczowe:** śluza żeglugowa, ocena stanu technicznego, konstrukcja stalowa, wytrzymałość konstrukcji.

**Abstract.** In the work procedure of technical state improving of Brzeg Dolny navigational lock-gate, threatened with possible damage, were discussed. Calculating works preceded by precise inventory works of lock-gate steel elements, with identification of stated corrosion damage of these elements. The results of investigation and measurement works with numerical calculations, allowed to point out the range of lock-gate repairing works and to publish the decision of possible further of this object exploitation.

**Keywords:** navigational lock, technical state assessment, steel construction, structural strength.

Rozwój żeglugi śródlądowej w Europie i na świecie jest konsekwencją przecięcia sieci transportu drogowego. Transport wodny śródlądowy uważany jest za najbezpieczniejszy, przyjazny środowisku, efektywny z uwagi na niewielkie koszty eksploatacji oraz koszty utrzymania infrastruktury [1]. W ostatnich kilku latach także w Polsce zaczęto rozważać możliwość zwiększenia udziału żeglugi śródlądowej w transporcie towarowym i pasażerskim, w tym rewitalizację ok. 700 km Odrzańskiej Drogi Wodnej (ODW) i przywrócenia jej funkcji drogi wodnej III klasy ważności. Odcinek od Kędzierzyna-Koźła do Brzegu Dolnego, tzw. Odra skanalizowana, składa się z 24 jazów i śluz pozwalających na żeglugę barkami o ładowności do 1000 t.

W latach siedemdziesiątych XX w., w okresie świetności żeglugi, Odrą transportowano nawet 12 – 14 mln t ładunków rocznie, a obecnie 3 – 4 mln t, co stanowi niewielki procent w porównaniu z transportem kolejowym i drogo-

wym. Wynika to z wieloletniego niedoinwestowania żeglugi śródlądowej i dekapitalizacji obiektów hydrotechnicznych, głównie śluz żeglugowych [2].

Z reguły najbardziej zniszczone są stalowe wrota śluz na skutek postępującej korozji i uszkodzeń od obiektów pływających. Remonty kapitalne śluz są rozłożone na poszczególne lata, ale czasem zachodzi konieczność doraźnej poprawy nośności wrot, aby ich zagrożenie awaryjne nie spowodowało zatrzymania żeglugi, jak w przypadku śluzy w Brzegu Dolnym, która w listopadzie 2014 r. została zamknięta ze względu na zły stan techniczny wrot wspornych głowy dolnej.

W artykule przedstawiono metodę badań, ocenę nośności i propozycję prac naprawczych konstrukcji stalowej wrot wspornych dolnej głowy śluzy w Brzegu Dolnym.

### Opis obiektu

Stopień wodny w Brzegu Dolnym to ostatni czynny stopień na skanalizowanym odcinku rzeki Odry. Tworzy go pięcioprzęsłowy jaz zasuwowy, elektrownia wodna o mocy 10 MW oraz śluza żeglugowa. Widok śluzy żeglugowej i wrot wspornych głowy dolnej, pokazano na fotografii 1.

Jednokomorowa śluza żeglugowa stopnia wodnego zlokalizowana jest w km 0,77 kanału żeglugowego od strony lewego brzegu rzeki Odry, w odległości ok. 130 m od lewego przyczółka jazu. Długość użytkowa śluzy



[Fot. S. Kostecki]

**Fot. 1.** Widok wrot dolnych i komory śluzy stopnia wodnego w Brzegu Dolnym  
*Photo 1. View of the lower lock-gate and the chamber of navigational lock Brzeg Dolny*

<sup>1)</sup> Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

<sup>\*)</sup> Autor do korespondencji:  
e-mail: stanislaw.kostecki@pwr.edu.pl

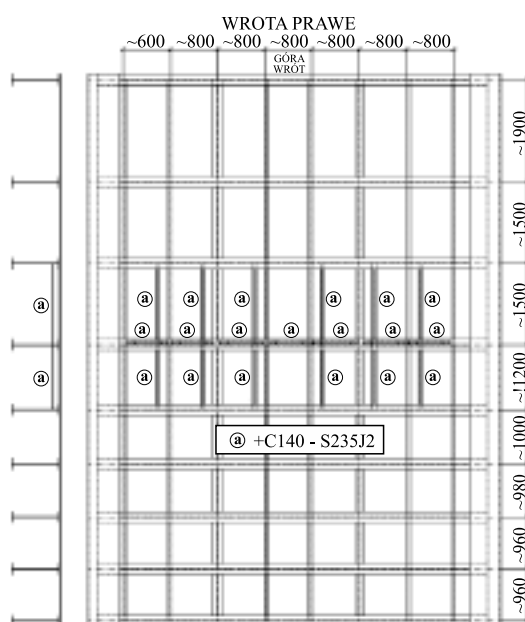
wynosi 224,90 m, a szerokość w świetle 12,0 m. Konstrukcja śluzy jest betonowa o ścianach wolno stojących w postaci murów oporowych. Zamknięcie komory śluzy stanowią dwuskrzydłowe stalowe wrota wsporne z napędem elektromechanicznym, oparte na żelbetowych konstrukcjach głowy dolnej i górnej. Napełnianie i opróżnianie komory śluzy odbywa się za pomocą krótkich kanałów obiegowych, zamykanych stalowymi zasuwami rolkowo-klinowymi o napędzie elektrycznym [3].

## Konstrukcja wrót wspornych głowy dolnej śluzy

Konstrukcja wrót wspornych głowy dolnej śluzy o wymiarach skrzydła  $H \times B = 8500 \times 7000$  mm wykonana została jako ruszt belkowy spawany z blachą opierającą ze stali St3S o granicy plastyczności  $f_y = 235$  MPa. Głównymi elementami nośnymi pojedynczego skrzydła wrót są poziome blachownice w liczbie dziewięciu w rozstawie od 900 mm w dolnej części do 1900 mm w górnej. Blachownice mają pasy o wymiarach  $b_f \times t_f = 200 \times 16$  mm, równoległe w części środkowej i zbieżące się w skrajnych przedziałach ku końcowi. Wysokość i grubość średnicy w części środkowej wynosi  $h_w \times t_w = 786 \times 12$  mm. Dźwigary poziome stężone są w rozstawie 2,40 m dwoma słupami – blachownicami pionowymi o wymiarach pasów  $b_f \times t_f = 160 \times 12$  mm i średnicy  $h_w \times t_w = 770 \times 12$  mm. Po obu stronach wrót znajdują się słupy skrajne o złożonym przekroju, które wiążą końce dźwigarów poziomych i stanowią mocowanie dla uszczelnień pionowych oraz oparcie dla podpór wrót w położeniu piętrzącym. Pomiedzy pionowymi słupami znajdują się słupki z ceowników C140 w rozstawie co 0,80 m (rysunek 1).

Dodatkowymi elementami stężającymi konstrukcję skrzydła, zapobiegającymi wyboczeniu, są dwie ukośne i krzyżujące się w środku wysokości belki ceowe C180, przyspawane do pasów dźwigarów głównych od strony wody dolnej. Dźwigary poziome i elementy pionowe stanowią ruszt, na którym opiera się poszycie z blachy stalowej grubości 12 mm.

Skrzydła wrót wspornych zawieszane są na dwóch łożyskach na górze i na dole wnęki w ścianie głowy śluzy. Napęd



Rys. 1. Wrota wsporne głowy dolnej w widoku od strony wody dolnej (część górna) – elementy opisane stanowią zaproponowane wzmocnienie wrót

Fig. 1 Lock-gate of the lower head in tailwater view (upper part) – described elements are the proposal of the lock-gate reinforcement

śluzy stanowią ciężna (drabinki palczaste) połączone przegubowo z górną krawędzią skrzydła w 1/3 ich rozpiętości od ściany śluzy, poruszane przez koła zębate, obracane silnikami elektrycznymi umiejscowionymi we wnętrzu głowy śluzy. W położeniu piętrzącym wrota opierają się na odpowiednich podporach występujących na krawędzi pionowej wrót we wnęce głowy śluzy oraz na sąsiednim skrzydle wrót.

## Badania wrót dolnych

Geometria konstrukcji śluzy nie została naruszona podczas długoletniej eksploatacji, a jej poszczególne elementy na całej długości nie są zdeformowane, a jedynie miejscowo odkształcone prawdopodobnie na skutek uderzeń jednostek śluzujących. Skorodowanie elementów stalowych śluzy jest zróżnicowane w zależności od ich umiejscowienia. W elementach znajdujących się stale pod wodą, tj. od poziomu 0,00 do poziomu 2,90 m licząc względem dna śluzy, korozja nie występuje, od poziomu 2,90 m do 4,0 m zaczyna się pojawiać i ma charakter powierzchniowy (korozja równomierna), natomiast od poziomu 4,0 m do poziomu 7,0 m w strefie wahań wody jest największa i przejawia się znacznymi ubytkami stali (korozja wżerowa o współczynniku korozji

wżerowej  $W_{kw} = 0,3$ ). Korozji uległy głównie elementy słupków pionowych rusztu oraz średniców blachownic poziomych (fotografia 2). Ubytki korozyjne maleją od poziomu 7,0 m do poziomu górnej krawędzi komory śluzy.

Znaczne ubytki korozyjne w blasze opierającej wrót spowodowały, że średnia jej grubość wynosi 7,8 mm w przypadku poziomu 4,0 – 6,0 m; 8,8 mm – poziomu 6,0 – 10,0 m i ponad 10 mm – poziomu 0,0 – 4,0 m. Stan techniczny podparcia i napędu wrót, w tym łożysk i ich mocowania, kół zębatach, mechanizmów napędowych oraz cięgien jest dobry. W efekcie ich sprawność jest bez zastrzeżeń [3].



Fot. 2. Korozja elementów stalowych wrót  
Photo 2. Lock-gate steel elements corrosion

[Fot. S. Koscielni]

## Wyniki obliczeń statyczno-wytrzymałościowych

Obliczenia statyczno-wytrzymałościowe rusztu piętrzącego zostały przeprowadzone dla stanu pierwotnego, tj. bez ubytków korozyjnych i dla stanu zastanego, tj. z uwzględnieniem rzeczywistych ubytków korozyjnych. Jako obciążenie dominujące przyjęto obciążenie hydrostatyczne naporem wody. Uwzględniono też obciążenie wiatrem (jak dla strefy I) oraz temperaturą (dla

temperatury początkowej – montażowej równej 8° C). Schematy statyczne konstrukcji rusztu piętrzącego przyjęto dla modelu uproszczonego jako zbiór belek wolnopodpartych. W przypadku belek poziomych założono schemat trójprzegubowy (przy wrotach zamkniętych) oraz schemat belki wolnopodpartej ze wspornikiem (przy wrotach częściowo otwartych). W obliczeniach szczegółowych przyjęto schemat rzeczywisty, tj. ruszt stalowy belek wzajemnie powiązanych między sobą z więzami sztywnymi [4]. Z przeprowadzonych analiz wytrzymałościowych wynika, że zachodzi zbieżność otrzymanych sił wewnętrznych, co jest spowodowane m.in. dużą różnicą sztywności pomiędzy belkami poziomymi a słupkami usztywniającymi. Słupki pionowe oprócz podparcia poszycia z blachy mają za zadanie usztywnić belki poziome blachownicowe.

Przy sprawdzaniu stanów granicznych nośności (zgodnie z obowiązującymi normami [5, 6]) poszczególnych elementów (oprócz poszycia) wykorzystano rezerwę plastyczną przekrojową, ponieważ wszystkie warunki dla poszczególnych elementów były spełnione, tj. wydłużalność stali  $A_5 > 15\%$ ,  $f_u/f_y > 1,2$ ; element zabezpieczony przed utratą stateczności, obciążenie statyczne.

W przypadku układu konstrukcyjnego nie wykorzystano rezerwy plastycznej ze względu na duże ubytki korozyjne. Przy obliczaniu blach opierających, o rzeczywistej grubości pomierzonej podczas prac inwentaryzacyjnych obiektu stwierdzono, że naprężenia w płytach prostokątnych wg teorii małych ugięć są niespełnione, nawet w modelu obliczeniowym, w którym przyjęto schemat płyty prostokątnej zamocowanej sztywno wzdłuż krawędzi.

W celu lepszego wykorzystania rezerwy nośności blach opierających wykorzystano teorię płyt o dużych ugięciach, tzn. uwzględniono odkształcenia w płaszczyźnie środkowej płyty. Analiza dużych ugięć płyt sprowadza się do rozwiązania, znanych w literaturze [4], dwóch nieliniowych równań różniczkowych opisanych we współrzędnych ortogonalnych  $x$  i  $y$ :

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{t}{D} \left( \frac{q}{t} + \frac{\partial^2 F \partial^2 w}{\partial y^2 \partial x^2} + \frac{\partial^2 F \partial^2 w}{\partial x^2 \partial y^2} - 2 \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial^4 F}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 F}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 F}{\partial y^4} = E \left[ \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right] \quad (2)$$

gdzie:

- $q$  – obciążenie obliczeniowe równomiernie rozłożone;
- $E = 210$  GPa – moduł Younga;
- $t$  – grubość płyty;
- $F$  – funkcja naprężeń Airy'ego;
- $w$  – funkcja ugięcia płyty ( $D = Et^3/12(1 - \nu^2)$ );
- sztywność płytowa;
- $\nu = 0,3$  – współczynnik Poissona.

Przybliżone rozwiązanie płyt wg teorii dużych ugięć, dla poszczególnych schematów podparć oraz stosunku boków prostokąta ( $a/b$ ) obliczanej blachy opierającej, można znaleźć m.in. w normie PN-EN 1993-1-7:2008. Zgodnie z teorią płyt o dużych ugięciach stan graniczny nośności jest wykorzystany w 99%. W obliczeniach nie uwzględniono współpracy belek rusztu piętrzącego z blachą opierającą ze względu na duże wykorzystanie ich nośności.

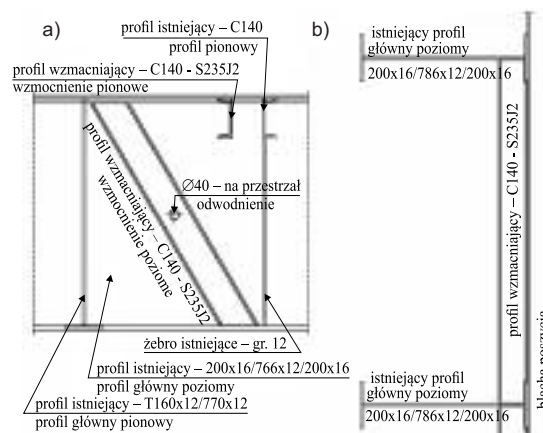
## Wzmocnienie konstrukcji wrót

Zaproponowano naprawę najbardziej skorodowanych elementów, występujących głównie w strefie wahanja zwierciadła wody. Wzmocnienie środka poziomych dźwigarów blachownicowych zaprojektowano w postaci semi-kraty zbudowanej z krzyżulców z C140 przyspawanych na płask do blachy środka i do pasów dźwigara, a wzmocnienie belek pionowych rusztu z ceowników C140 przyspawanych do blachy poszycia, obok istniejących skorodowanych słupków (rysunek 2). W celu poprawy bezpieczeństwa eksploatacyjnego obiektu wprowadzono ograniczenie użytkownika śluzy w przypadku wystąpienia różnicy poziomów wody dolnej i górnej przekraczającej 7 metrów. Poprawność przyjętego rozwiązania, tj. zdolność wrót do przenoszenia obciążeń, potwierdzono obliczeniami numerycznymi MES zgodnie z obowiązującymi normami.

## Podsumowanie

Na przykładzie wrót wspornych głowy dolnej śluzy w Brzegu Dolnym na Odrze omówiono metodykę postępowania podczas weryfikacji nośności stalowej konstrukcji hydrotechnicznej, w części znacznie osłabionej na sku-

tek korozji. Na podstawie przeprowadzonych badań, pomiarów oraz obliczeń statyczno-wytrzymałościowych, zrealizowanych wg obowiązujących norm i za pomocą MES stwierdzono, że istnieje możliwość dalszej bezpiecznej eksploatacji konstrukcji, pod warunkiem niewielkiego i mało kosztownego wzmocnienia najbardziej skorodowanych elementów wrót. Pozytywną weryfikację nośności wzmocnionej konstrukcji uzyskano po wprowadzeniu do obliczeń niewielkich rezerw plastycznych przekrojowych elementów konstrukcji oraz przez wykorzystanie teorii dużych ugięć do obliczania blach opierających.



Rys. 2. Szczegół wzmocnienia środka dźwigara poziomego (a) i blachy opierającej w postaci pionowego ceownika C140 (b)

Fig. 2. Reinforcement detail of lock-gate steel elements (a) in the shape of vertical U-iron (b)

## Literatura

- [1] Rohács J., Simongáti G., The role of inland waterway navigation in a sustainable transport system, *Transport*, Vol. XXII, No 3, 2007, 148–153.
- [2] Kledyński Z., *Remonty budowli wodnych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2006.
- [3] Kostecki S., Machajski J., Gierczak J., *Ekspertyza stanu technicznego śluzy dużej na stopniu wodnym Brzeg Dolny zlokalizowanym w km 281,60 rzeki Odry*. Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego. Wrocław, 2015.
- [4] Timoshenko S., Woinowsky-Krieger S., *Theory of Plates and Shells*, McGraw-Hill Book Company, INC., New York 1959.
- [5] PN-EN 1993-1-1 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [6] PN-EN 1993-1-5 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-5: Blachownice.

Przyjęto do druku: 27.08.2015 r.