

Zmęczenie stalowych konstrukcji hydrotechnicznych w raporcie Grupy Roboczej WG-189 PIANC

Dr inż. Ryszard A. Daniel
RADAR Structural, Holandia

Pamięci Profesora Adama Bolta

Stalowe konstrukcje hydrotechniczne, takie jak wrota śluz żeglugowych, jazów rzecznych, barier przeciwsztormowych lub przypływowych poddane są działaniu obciążeń powtarzalnych, częściej zwanych cyklicznymi, prowadzących do zmęczenia materiału. Jednakże zjawiska zmęczeniowe, powszechnie znane na przykład w budownictwie mostowym, przemysłowym czy okrętowym, były przez dłuższy czas niedostatecznie doceniane w projektowaniu konstrukcji hydrotechnicznych. Rosnąca liczba awarii zmęczeniowych tych konstrukcji – szczególnie w ostatnich dwóch dekadach ubiegłego wieku – uświadomiła społeczności inżynierskiej konieczność systematycznego włączenia zagadnień wytrzymałości zmęczeniowej do praktyki projektowej, wykonawczej, naprawczej, a także do tak zwanego *asset management* (zarządzania aktywami) ruchomych konstrukcji wodnych.

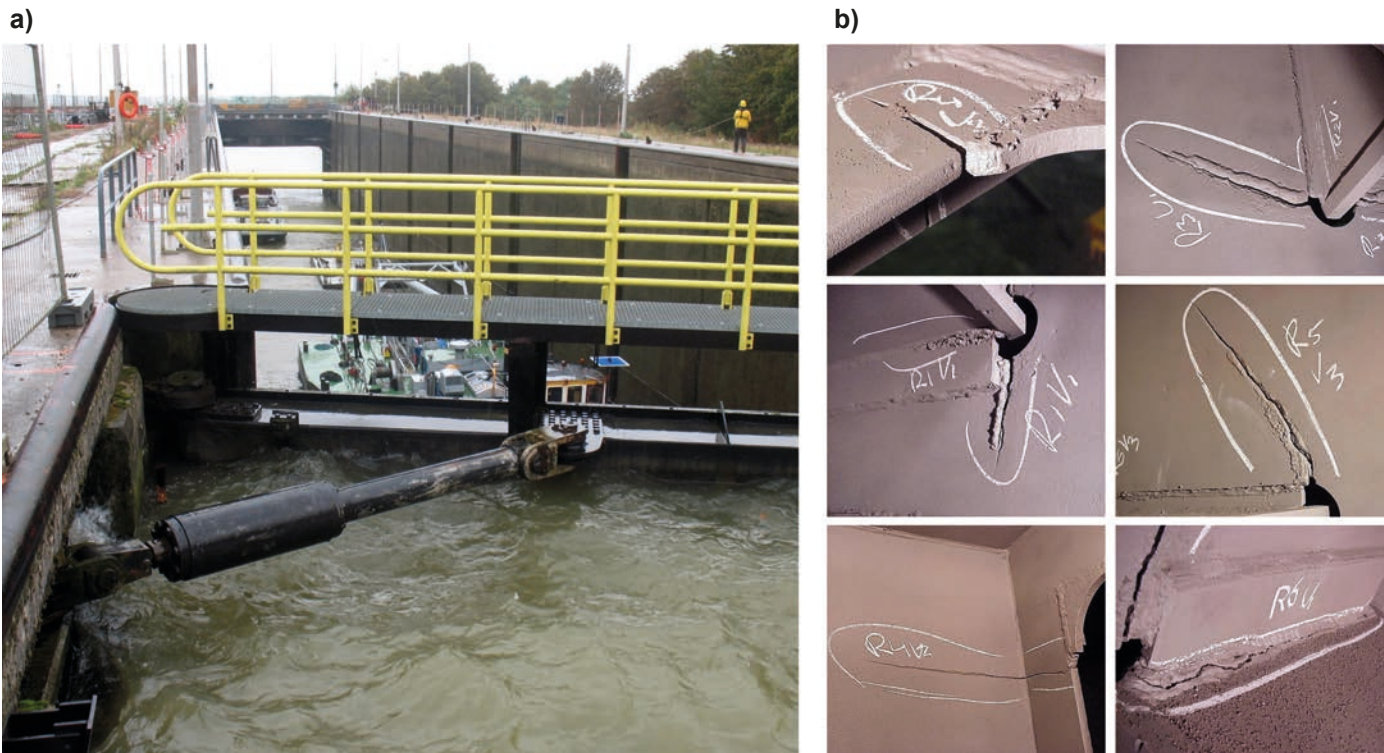
Jednym z dowodów tego uświadomienia było powołanie przez Światowe Stowarzyszenie Rozwoju Infrastruktury Żeglugowej PIANC Grupy Roboczej *Fatigue of Hydraulic Steel Structure* (Zmęczenie Stalowych Konstrukcji Hydrotechnicznych). Grupa ta, oznaczona symbolem WG-189, zakończyła swe prace w 2020 roku opublikowaniem 110-stronicowego raportu pod tym samym tytułem [15]. Jak większość raportów Stowarzyszenia PIANC, także i ten na pewno przyczyni się do dalszego rozwoju i ujednolicenia międzynarodowej praktyki inżynierskiej w swoim zakresie. Niniejszy artykuł ma na celu przedstawienie tła i zawartości tego raportu kolegom w kraju

oraz podkreślenie znaczenia problematyki zmęczeniowej w projektowaniu i utrzymaniu stalowych konstrukcji wodnych.

ŹRÓDŁA I SKUTKI OBCIĄŻEŃ ZMĘCZENIOWYCH

Chociaż większość obecnie istniejących stalowych konstrukcji hydrotechnicznych nigdy nie była przedmiotem analiz zmęczeniowych, to nie można powiedzieć, że troska o wytrzymałość zmęczeniową była obca projektantom tych konstrukcji. Podobnie jak w innych dziedzinach inżynierii troska ta jest tak stara jak sama wiedza o mechanizmach zmęczenia metali, której narodziny zwykło się przypisywać badaniom Augusta Wöhlera. Badania te i wynikające z nich *krzywe Wöhlera* dotyczyły pierwotnie osi wagonów kolejowych [20], ale uświadomiły projektantom także innych konstrukcji ograniczoną tak zwaną wytrzymałości zmęczeniowej.

W wielu konstrukcjach stalowych, w tym także w konstrukcjach hydrotechnicznych, problem ten zaostrzyło zastąpienie nitowania połączeniami spawanymi. Połączenia te, choć pomogły rozwiązać szereg innych problemów, wprowadziły bowiem znacznie wyraźniejsze tak zwane karby, czyli miejsca nieciągłości materiałowych, w których zwykle następuje spiętrzenie naprężeń i inicjacja rys zmęczeniowych. Przykładem mogą tu być dramatyczne wręcz rysy we wrotach wspornych holenderskich śluz Born i Maasbracht na Mozie (ściślej biorąc na tak zwanym Kanale Juliany przekopanym wzdłuż rzeki do celów żeglugi) wybudowanych w początku lat 60. XX wieku (rys. 1). Wrota obydwu tych śluz przenoszą około 12,0 m różnicy pozio-



Rys. 1. Rysy zmęczeniowe wrót wspornych Śluz Born na Mozie, Holandia [5]
a) skrzydło wrót pod obciążeniem; b) przykłady rys zmęczeniowych po około 40 latach pracy

mu wody przy każdorazowym śluzowaniu (rys. 1a), zaś dzienna liczba śluzowań często przekracza 30. Stanowi to bardzo znaczne obciążenie zmęczeniowe. Rys. 1b przedstawia stan przed remontem kapitalnym wrót w roku 2002, a więc po około 40 latach ich pracy.

Wyraźnie widać, że nie był to w tym przypadku pierwszy remont obejmujący reperację rys zmęczeniowych. Poprzednie spawania tych rys, choć można kwestionować ich jakość, nie przyniosły oczekiwanego efektu, a nawet pogorszyły sytuację przez wprowadzenie w materiale nowych karbów wywołujących spiętrzenia naprężeń. Każda, nawet najstaranniej wykonana spoina, choć daje połączenie pożądanej wytrzymałości, stanowi jednak lokalne naruszenie struktury krystalicznej stali, co już samo w sobie tworzy karby zmęczeniowe.

Powyższy przykład pokazuje nie tylko, do jak poważnych szkód prowadzi zmęczenie stali w konstrukcjach hydrotechnicznych, ale także jak trudno jest szkody te usunąć. Podobnych przykładów było dużo w ostatnim dwudziestolecu minionego wieku, tak w Europie, jak i w Ameryce. Na przykład w Niemczech poważnym awariom zmęczeniowym uległo szereg spawanych wrót śluz, w tym niektórych (jak wrota dolne Śluzy Geesthacht na Łabie) po liczbie cykli obciążenia nie przekraczającej nawet $2 \cdot 10^4$ [13]. Awarie te doprowadziły do zmian wielu zasad konstruowania ruchomych zamknięć wodnych oraz do dość rygorystycznych wymagań pod adresem ich projektowania na zmęczenie w normie DIN 19704 [9].

W Stanach Zjednoczonych podobne awarie gruntownie zmieniły poglądy na konstruowanie węzłów w układach statycznych zamknięć wodnych. Na rys. 2a przedstawiono wcześniejsze rozwiązania połączeń spawanych w takich węzłach. Zwróćmy uwagę, że na przykład półki nośnych belek wrót łączono

wówczas „na zakładkę” i całe węzły spawano spoinami pachwinowymi. Połączenia takie – wywodzące się jeszcze z konstrukcji nitowanych – zawierały cały szereg karbów i mimośrodów prowadzących do koncentracji naprężeń, czego skutkiem były rysy zmęczeniowe widoczne na pierwszych trzech zdjęciach. Potwierdziły to badania prowadzone wówczas przeważnie techniką tensometryczną, jak na czwartym zdjęciu z rys. 2a. Dzisiejsze rozwiązania takich węzłów są dlatego zupełnie odmienne, co widać na zdjęciu z rys. 2b. Półki profili łączą się w tej samej płaszczyźnie, to jest bez mimośrodu, karby materiałowe łagodzi się zaokrąglonymi wycięciami blach węzłowych, zaś większość spoin to spoiny czołowe.

Warto zauważyć, że obciążenia hydrostatyczne wrót śluz żeglugowych są „klasycznym”, ale nie jedynym przykładem cyklicznych obciążeń zmęczeniowych w stalowych konstrukcjach hydrotechnicznych. W tabl. 1 podano listę często spotykanych obciążeń tego rodzaju we wrotach śluz, jazów rzecznych i ruchomych barier sztormowych. Zrozumiałe jest, że rząd naprężeń i przeciętna liczba cykli tych obciążeń, a więc parametry decydujące o zmęczeniu, bardzo zależą od lokalnych warunków. Mimo tego, w tablicy podano też szacunkowe zakresy tych parametrów. Dane te należy traktować jako służące jedynie ogólnemu porównaniu w najczęściej spotykanych projektach, nie zaś jako ograniczenia lub wytyczne projektowe.

Obciążenia cykliczne niewymienione w tabl. 1, jak fale sejsmiczne, grawitacyjne czy inne, nie są zwykle brane pod uwagę w analizach zmęczeniowych ze względu na niewielką liczbę cykli w okresie użytkowania konstrukcji. W sytuacjach, gdy elementy stalowych konstrukcji hydrotechnicznych poddane są więcej niż jednemu z wymienionych w tabl. 1 cyklicznych obciążeń, projektant stara się najczęściej zastąpić te obciążenia równoważ-



Rys. 2. Nieprawidłowe (a) i prawidłowe (b) węzły konstrukcji hydrotechnicznych poddanych obciążeniom zmęczeniowym, przykłady [15]

Tabl. 1. Główne obciążenia cykliczne w stalowych konstrukcjach hydrotechnicznych

Obciążenie cykliczne	Przeciętny zakres naprężeń [% f_y]	Przeciętna liczba cykli [1/rok]	Zakres wpływu [globalny/lokalny]
Parcie hydrostatyczne na skutek różnicy poziomów wody	30 ÷ 60%	$1,2 \cdot 10^4 \div 3,0 \cdot 10^3$	globalny
Fala (tzw. znaczna) wiatrowa	5 ÷ 20%	$10^5 \div 10^4$	globalny
Fala pływowa (przyprływy i odpływy morza)	10 ÷ 30%	705	globalny
Obciążenia hydrodynamiczne (od energii przepływu wody)	2 ÷ 15%	$10^5 \div 10^4$	lokalny
Obciążenia od sił napędowych, bezwładności, tarcia itp.	20 ÷ 40%	$2,0 \cdot 10^4 \div 5,0 \cdot 10^3$	lokalny
Kotwienie, sprężanie przeciw odwrotnemu parciu wody itp.	20 ÷ 40%	$10^4 \div 2,0 \cdot 10^3$	lokalny
Regulacja ciśnienia i balastu w komorach wyporu	10 ÷ 30%	$10^4 \div 2,0 \cdot 10^3$	lokalny

nym pojedynczym obciążeniem cyklicznym o stałej amplitudzie. Można to zrobić metodą Palmgren-Minera, której przykład zastosowania przedstawiono między innymi w książce [5].

TŁO RAPORTU GRUPY ROBOCZEJ WG-189 PIANC

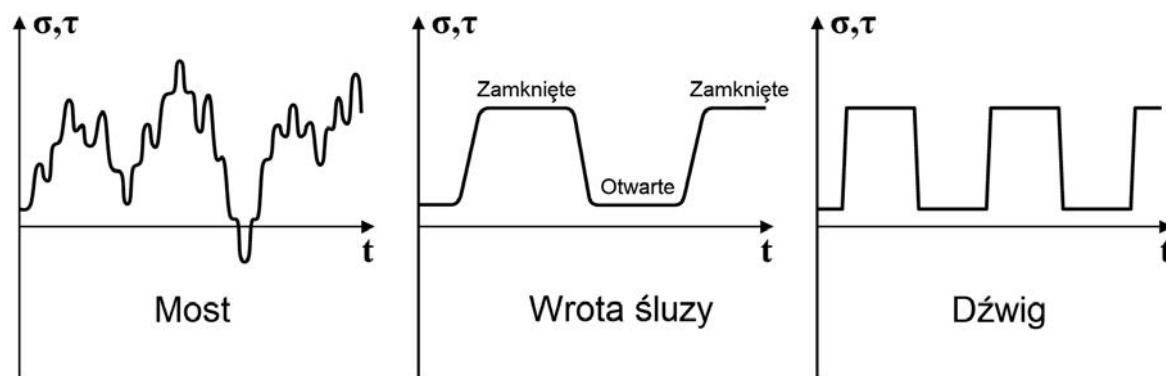
Wspomniane wyżej awarie zmęczeniowe wrót śluz i innych konstrukcji hydrotechnicznych zrodziły potrzebę opracowania metod projektowania (w pewnej mierze także wykonawstwa i utrzymania) uwzględniających specyfikę zmęczeniową tych konstrukcji. Trzeba sobie przy tym zdać sprawę, że konstrukcje hydrotechniczne stanowią raczej niewielki segment rynku konstrukcji stalowych. Ich projektanci szukali więc metod zapewnienia im dostatecznej wytrzymałości zmęczeniowej w praktyce stosowanej wobec innych konstrukcji stalowych, zbliżonych pod względem charakteru obciążeń. Tak na przykład pierwsze w Holandii obliczenia wrót śluz na zmęczenie [6] autor niniejszego artykułu prowadził według norm dla dźwigów. Miało to miejsce w początku lat 90. XX wieku, a podejście to – stosowane wtedy szeroko także przez projektantów w Niemczech [13] – wynikało z podobieństwa cykli obciążeń (rys. 3).

Zauważmy, że spektra obciążeń zmęczeniowych konstrukcji hydrotechnicznych, jak wrota śluz, dość zasadniczo różnią się od podobnych spektrów dla mostów. Warto o tym pamiętać,

gdyż aktualna wiedza o zjawiskach zmęczeniowych i metody obliczeń konstrukcji stalowych na zmęczenie w dużym stopniu opierają się na doświadczeniach i badaniach mostów. To samo można powiedzieć o aktualnych normach, w tym o części 9. Eurokodu 3, EN-1993-1-9 [4]. Pokusa sięgania do tych doświadczeń i badań przy projektowaniu stalowych konstrukcji hydrotechnicznych jest więc duża i częściowo uzasadniona. Trzeba jednak także brać pod uwagę pewne różnice wynikające z odmiennego podejścia. Różnice te w ogólnym skrócie przedstawiono w tabl. 2. Za punkt wyjścia przyjęto w tym porównaniu wrota śluz żeglugowych z ortotropową płytą nośną oraz mosty drogowe z ortotropową płytą pomostu. Jednakże wskazane różnice występują również między wieloma innymi rodzajami stalowych konstrukcji hydrotechnicznych i mostowych.

Jak wynika z tabl. 2, różnice w pracy na zmęczenie konstrukcji hydrotechnicznych oraz mostowych są dość zasadnicze i dotyczą tak charakteru samych obciążeń zmęczeniowych, jak i możliwości kontroli ryzyka awarii konstrukcji na skutek zmęczenia. Niektóre z tych różnic mogą na pierwszy rzut oka nie budzić niepokoju projektanta, ale po bliższym przyjrzeniu się potrzeba innego podejścia okazuje się ewidentna.

Rozpatrzmy na przykład różnice w liczbie cykli i zakresie obciążeń. Wynika z nich, że obciążenia zmęczeniowe obydwu rodzajów konstrukcji można ogólnie sklasyfikować jako:



Rys. 3. Typowe spektra obciążeń zmęczeniowych dla trzech rodzajów konstrukcji [5]

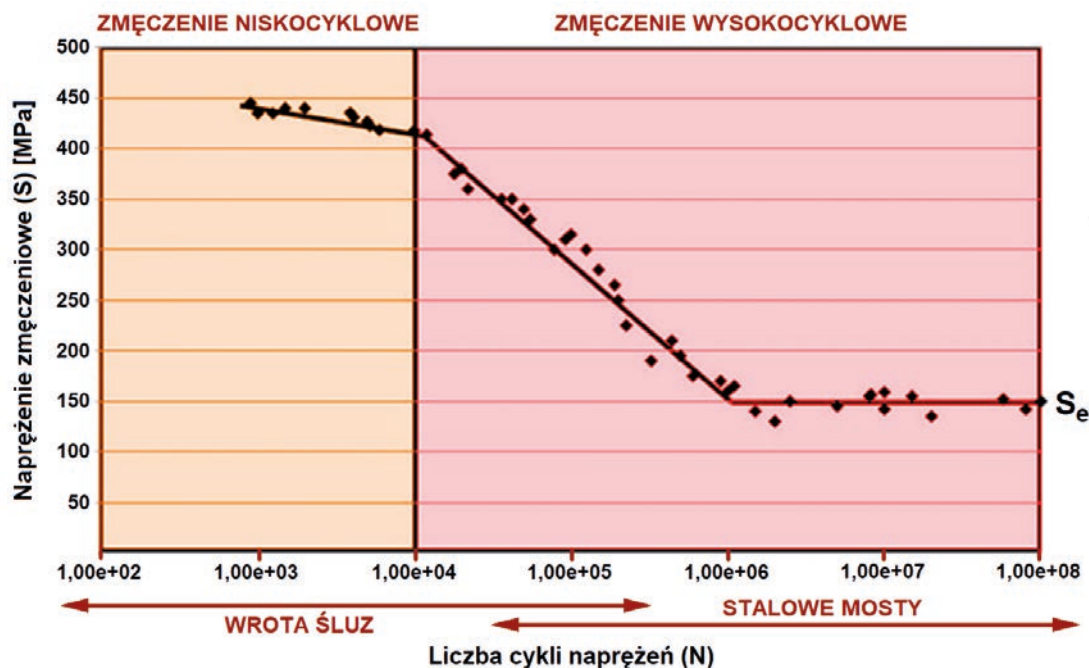
Tabl. 2. Porównanie aspektów zmęzeniowych zamknięcia wodnego i mostu

Aspekt zmęzeniowy	Zamknięcie wodne	Most stalowy
Zasięg obciążeń zmęzeniowych	Globalny: Parcie hydrostatyczne na całej / prawie całej powierzchni konstrukcji. Niewielka możliwość redystrybucji naprężeń.	Lokalny: Koła pojazdu obciążają pomost miejscowo. Duża możliwość redystrybucji naprężeń po wystąpieniu rys.
Charakter spektrum naprężeń	Regularny: Nieregularności od fal i innych obciążeń przeważnie niewielkie. Łatwy do określenia „blokowy” cykl naprężeń.	Nieregularny: Duża rozbieżność i złożoność cykli naprężeń ze względu na różne pojazdy, ich prędkości (wpływy dynamiczne) itp.
Liczba cykli obciążeń w okresie pracy	Niska: Nawet przy intensywnym ruchu np. w hollenderskich śluzach liczba ta rzadko przekracza 500 000 w okresie użytkowania.	Wysoka: Np. pomosty mostów drogowych zwykle projektuje się na przejazd kilkuset milionów pojazdów ciężkich.
Zakres naprężeń zmęzeniowych	Wysoki: W przypadku śluz itp. zakres ten wynika z różnic poziomów wody. Normalne i ekstremalne stany tych różnic są często zbliżone.	Niski: Np. w mostach drogowych najwyższa liczba cykli naprężeń jest wynikiem przejazdu stosunkowo lekkich pojazdów.
Warunki inspekcji konstrukcji	Bardzo trudne: Pełna inspekcja rys zmęzeniowych możliwa tylko po wstrzymaniu żeglugi i wyjęciu konstrukcji z wody.	Dogodne: Większość mostów ma wózki inspekcyjne itp. stwarzające dobre warunki inspekcji, nawet bez przerw w ruchu.
Warunki naprawy rys zmęzeniowych	Bardzo trudne: Naprawy rzadko praktykowane, poza obiektem lub po kosztownym odwodnieniu przestrzeni wokół konstrukcji.	Dogodne: Wyłączenia (pasma) ruchu i usunięcia nawierzchni wymaga tylko naprawa pomostu. Roboty zwykle na obiekcie.
Kontrolowany przebieg zmęczenia	Nieemożliwy: Efektywna kontrola zwykle niemożliwa ze względu na bardzo trudne warunki inspekcji. Rys przeważnie nie dopuszcza się.	Możliwy: Kontrola propagacji rys możliwa i zwykle praktykowana. Stabilne rysy dopuszcza się przy programie inspekcji i reperacji.

- zamknięcia wodne: niska liczba cykli – wysoki zakres obciążeń,
- konstrukcje mostowe: wysoka liczba cykli – niski zakres obciążeń.

Różnicę tę przedstawiono na tak zwanej krzywej zmęzeniowej S-N na rys. 4 (krzywa Wöhlera), tu w ilustracji SolidWorks Corp. [17]. Wypada zauważyć, że w przedziale liczby cykli naprężenia dla wrót śluz krzywa ta ma krzywiznę odwrotną do tej w przedziale liczby cykli naprężenia dla mostów. Oznacza to

między innymi, że o ile w mostach można często liczyć na pewne spowolnienie propagacji rys zmęzeniowych z biegiem czasu, to we wrótach śluz i podobnych konstrukcjach hydrotechnicznych ma zwykle miejsce zjawisko przeciwne – przyspieszenie propagacji tych rys. Stanowi to jeszcze jeden argument (obok wspomnianego w tabl. 2 globalnego zasięgu obciążeń zmęzeniowych), by projektanci konstrukcji hydrotechnicznych nie liczyli na tak zwaną redystrybucję naprężeń i możliwość kontroli przebiegu procesu zmęczenia.



Krzywa na podstawie: "Preventing Mechanical Failure", technical paper, Dassault Systèmes SolidWorks Corp., Concord (MA), 2009.

Rys. 4. Liczba cykli i zakres naprężeń zmęzeniowych we wrótach śluz i w mostach na krzywej S-N

Der Eurocode für den Stahlbau

Dipl.-Ing. M. Deutscher (BAW)

* * *

Zuverlässigkeitskonzept	Schadensfolge	
	niedrig	hoch
Konzept der Schadens-toleranz	1,0	1,15
Konzept der sicheren Lebensdauer	1,15	1,35

Tabelle 6: γ_{Mf} – Faktoren für die Ermüdungsfestigkeit

Für Ermüdungsnachweise von Stahlwasserbauten wird in der E DIN 19704-1 ein Teilsicherheitsbeiwert auf der Widerstandsseite von $\gamma_{Mf} = 1,35$ vorgegeben. Beim Ermüdungsnachweis von Stauwandblechen darf der Teilsicherheitsbeiwert auf $\gamma_{Mf} = 1,15$ reduziert werden, wenn die Normalspannungen im Druckschwellbereich liegen.

Tłumaczenie z niemieckiego:

Emblemat BAW

Eurokod dla konstrukcji stalowych

Dipl.-Ing. M. Deutscher (BAW)

Federalny Instytut Budownictwa Wodnego
Eurokody dla Wodnego Budownictwa Transportowego
Karlsruhe, 8 i 9 październik, 2012.

* * *

Koncepcja niezawodności	Następstwo awarii	
	niewielkie	wysokie
Koncepcja tolerancji szkód	1,0	1,15
Koncepcja bezpiecznego okresu użytkowania	1,15	1,35

Tablica 6: Współczynniki γ_{Mf} wytrzymałości zmęczeniowej

Dla analiz zmęczeniowych stalowych konstrukcji hydrotechnicznych E DIN 19704-1 podaje częściowy współczynnik pewności dla wytrzymałości $\gamma_{Mf} = 1,35$. Przy obliczeniach zmęczeniowych płyt ścian piętrzących współczynnik ten można obniżyć do $\gamma_{Mf} = 1,15$, jeżeli zmiany naprężeń normalnych przebiegają w całości w strefie ściskanej.

Rys. 5. Współczynnik na zmęczenie γ_{Mf} według Eurokodu 3 i DIN 19704 w wymaganiach BAW

Wziąwszy pod uwagę wspomniane aspekty specyfiki procesu zmęczenia w konstrukcjach hydrotechnicznych, nie powinno dziwić, że norma DIN 19704 [9] jednoznacznie kwalifikuje te konstrukcje jako nietolerujące szkód zmęczeniowych i o wysokich konsekwencjach awarii, co zgodnie z Eurokodem 3, EN-1993-1-9 [4], wymaga stosowania najwyższej wartości tak zwanego materiałowego współczynnika bezpieczeństwa na zmęczenie $\gamma_{Mf} = 1,35$. Niemiecki Federalny Instytut Budownictwa Wodnego (BAW) konsekwentnie wymaga stosowania tej zasady, co widać na przykład we fragmencie wytycznych skopiowanym na rys. 5 [8] z tłumaczeniem na język polski autora. Podobne stanowisko zajmują administracje infrastruktury wodnej w innych krajach Europy, w tym w Holandii, choć dyskusje na ten temat nadal trwają.

Już z tego krótkiego szkicu wyraźnie widać, że istniała potrzeba autorytatywnego zebrania wiedzy i doświadczeń na temat zmęczenia konstrukcji hydrotechnicznych w jeden dokument, oceny tych doświadczeń i dotychczasowych praktyk oraz wytycznych zaleceń postępowania w tej dziedzinie. Raport

Grupy Roboczej PIANC WG-189 [15] stanowi odpowiedź na tę potrzebę. Warto dodać, że raport ten – jak zresztą większość raportów PIANC – nie ogranicza się do kwestii samego projektowania konstrukcji hydrotechnicznych. Podejmuje on też szereg istotnych problemów wykonawczych mających wpływ na zmęczenie, jak również zagadnień materiałowych, utrzymania, diagnostyki, reperacji szkód zmęczeniowych itp.

PROFIL I PRZEBIEG PRAC GRUPY ROBOCZEJ

Chociaż Grupę Roboczą WG-189 „Zmęczenie Stalowych Konstrukcji Hydrotechnicznych” powołano z inicjatywy autora niniejszego artykułu, to wypada zaznaczyć, że inicjatywa ta znalazła natychmiast zrozumienie i poparcie Komisji Żeglugi Śródlądowej (InCom) PIANC, w tym jej przewodniczącego, profesora Philippe Rigo z Uniwersytetu w Liège w Belgii. Również werbunek czołowych ekspertów w tej dziedzinie do pracy w Grupie Roboczej nie przysporzył autorowi specjalnych pro-

blemów. W skład WG-189 weszli specjaliści od problematyki zmęzeniowej z zarządów żeglugi i gospodarki wodnej krajów dysponujących rozwiniętą infrastrukturą w tej dziedzinie, w tym:

- Holandia: Rijkswaterstaat, Grote Projecten en Onderhoud (GPO);
- USA: U.S. Army Corps of Engineers (USACE), Technical Center of Expertise for Welding and Metallurgy;
- Niemcy: Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Referat Stahlbau;
- Francja: Centre Technique Industriel de la Construction Métallique (CTICM);
- Belgia: Vlaamse Overheid, Mobiliteit en Openbare Werken (MOW).

Nie mniej ważną i produktywną grupę członków stanowili eksperci zmęczeniowi czołowych biur projektów o międzynarodowej renomie w stalowym budownictwie hydrotechnicznym, a wśród nich:

- Royal Haskoning DHV, Holandia i Wielka Brytania;
- Iv-Groep, Iv-Infra, Holandia;
- Ove Arup & Partners, Wielka Brytania;
- Tractebel Engineering N.V., Belgia;
- IRS Stahlwasserbau Consulting AG, Niemcy;
- Ingenieurbüro Dipl.-Ing. Horst Wehner, Niemcy.

Grupa Robocza WG-189 korzystała dorywczo także z doradztwa ze strony ekspertów z uniwersytetów, instytutów naukowo-badawczych oraz z przemysłu. Mimo starań autora nie udało się niestety zaangażować w prace Grupy specjalisty z Polski. Rozmowy w tej sprawie z przedstawicielami trzech politechnik – Warszawskiej, Wrocławskiej i Gdańskiej – wykazały wprawdzie zainteresowanie tematem, ale do zgłoszenia udziału nie doszło. W przypadku Politechniki Gdańskiej mogła temu przeszkodzić nagła śmierć profesora Adama Bolta, który rozumiał wagę takiego udziału i podjął się pomocy w zaangażowaniu do niego osoby z Uczelni. Między innymi dlatego niniejszy artykuł zadedykowany jest pamięci Profesora.

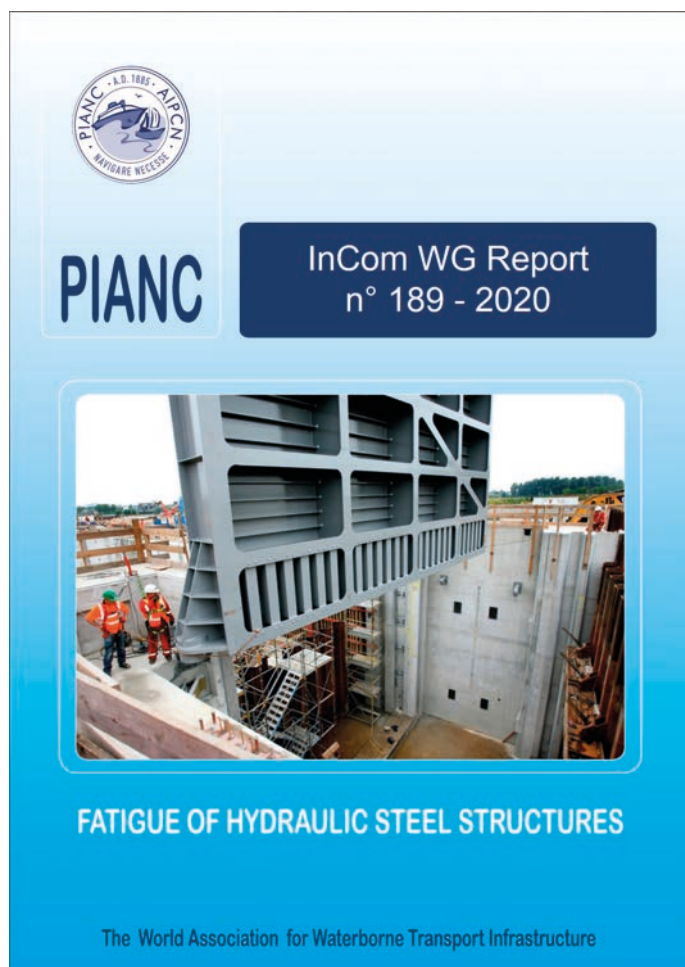
Działalność grup roboczych PIANC ma już długą tradycję i pewną ogólną metodykę. Tę drugą warto tu krótko przedstawić, gdyż może ona kolegom w kraju służyć za przykład przy efektywnym organizowaniu i prowadzeniu międzynarodowych grup roboczych o różnych profilach, niekoniecznie w ramach PIANC.

Punktem wyjścia jest dokument zwany *Terms of Reference* zatwierdzony przez odpowiednią Komisję – w tym przypadku InCom – i określający temat, cele, bardzo ogólne metody pracy oraz ramy oczekiwanego raportu. Zadaniem wyznaczonego przez Komisję przewodniczącego grupy jest wtedy przygotowanie i przedstawienie na pierwszym zebraniu pod dyskusję planu przyszłego raportu. Propozycja tego planu sięga niewiele dalej niż ogólny spis treści i zostaje przez Grupę przedyskutowana, tu i ówdzie zmieniona, a następnie Grupa wybiera z własnego grona tak zwanych „wiodących” autorów poszczególnych rozdziałów oraz autorów pomocniczych. Nie oznacza to oczywiście, że tylko ci autorzy będą następnie opracowywać rozdziały raportu. Od każdego członka Grupy oczekuje się wkładu (na miarę wiedzy, doświadczenia, dostępu do danych itp.) we wszystkie części raportu. Jednak wspomniani autorzy będą zwykle mieli wkład największy i będą odpowiedzialni za postęp i koordynację prac nad rozdziałami.

Opracowywanie i redakcję rozdziałów poprzedza zwykle (lub towarzyszy temu równolegle) przegląd istotnych doświadczeń z praktyki. Jeżeli tematem Grupy Roboczej jest na przykład konkretna grupa konstrukcji wodnych, to opracowuje się przeglądy istotnych zrealizowanych projektów (*project reviews*) z tej grupy. W przypadku Grupy WG-189, członkowie – obok projektów – sporządzali także krótkie przeglądy znaczących przypadków awarii zmęczeniowych, metod przeciwdziałania takim awariom oraz skutecznych ich reperacji itp.

Zebrane materiały, szkice rozdziałów i inne pomocne opracowania przedstawia się i omawia na plenarnych spotkaniach Grupy mniej więcej co 4 miesiące, organizowanych kolejno przez członków grupy w ich krajach i trwających 2 ÷ 3 dni. Od organizatora oczekuje się wtedy zapewnienia miejsca spotkań, skromnego posiłku w przerwach obrad i przynajmniej jednej wycieczki na obiekt związany z tematem prac grupy. Wszelkie inne podróże, noclegi, posiłki itp. uczestnicy organizują i finansują we własnym zakresie. Grupa Robocza WG-189 spotkała się w sumie 8 razy, kolejno w następujących miastach:

1. Bruksela, Belgia – luty 2016,
2. Rotterdam, Holandia – czerwiec 2016,
3. Portland, Oregon, USA – październik 2016,



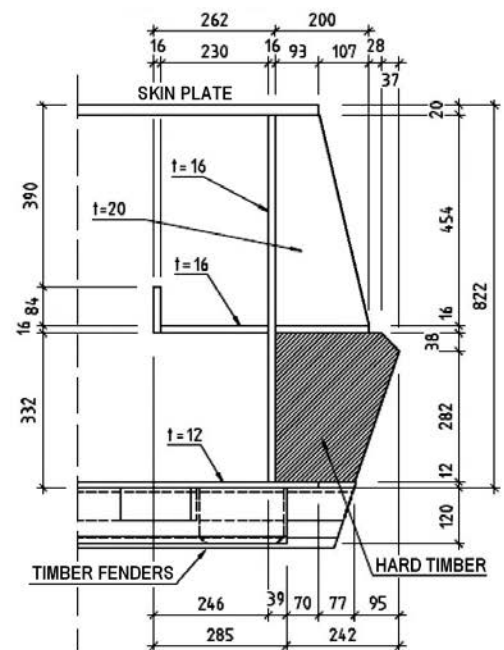
Rys. 6. Strona tytułowa raportu Grupy Roboczej PIANC WG-189 [15]

- ją się w praktyce niższe niż mogłoby się to wydawać na pierwszy rzut oka. Wynika to z pewnej kultury „low budget” głębiej zapewne zakorzenionej wśród specjalistów technicznych niż na przykład ludzi biznesu czy menadżerów. Poza tym, zainwestowane koszty zwracają się zwykle z nawiązką w postaci dodatkowej wiedzy zdobytej przez pracę w grupie, zaprezentowanych własnych możliwości i związanej z tym pewnej reklamy, nawiązanych kontaktów itp. Tak więc dla organizacji reprezentujących odpowiedni poziom i ambicję w danej dziedzinie uczestnictwo w grupie roboczej PIANC jest na pewno warte polecenia.

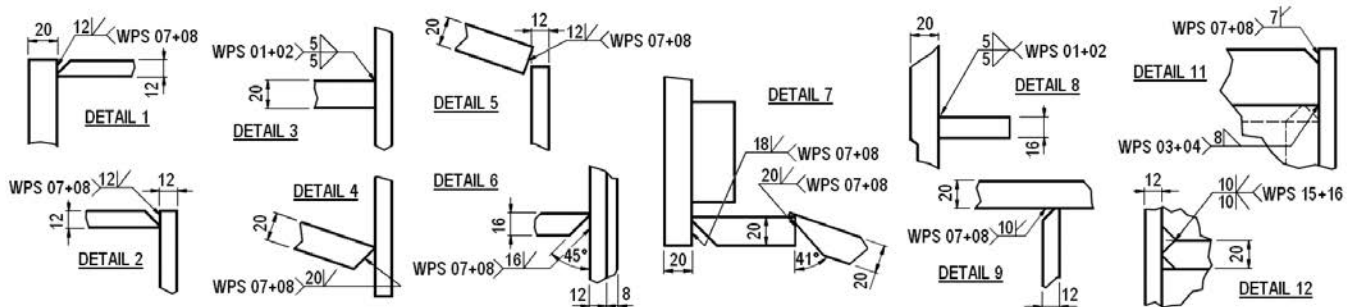
ZMĘCZENIOWE ASPEKTY PROJEKTOWANIA I UTRZYMANIA

Zagadnienia zmęczeniowe w stalowych konstrukcjach hydrotechnicznych można najogólniej podzielić na dwie grupy, odpowiadające na dwa bardzo konkretne pytania:

1. Co robić, by zapobiec awariom i szkodom zmęczeniowym?
2. Jak skutecznie usuwać szkody zmęczeniowe, gdy te występują?



MITER POST SECTION



BASED ON DESIGN DRAWINGS BY WITTEVEEN + BOS

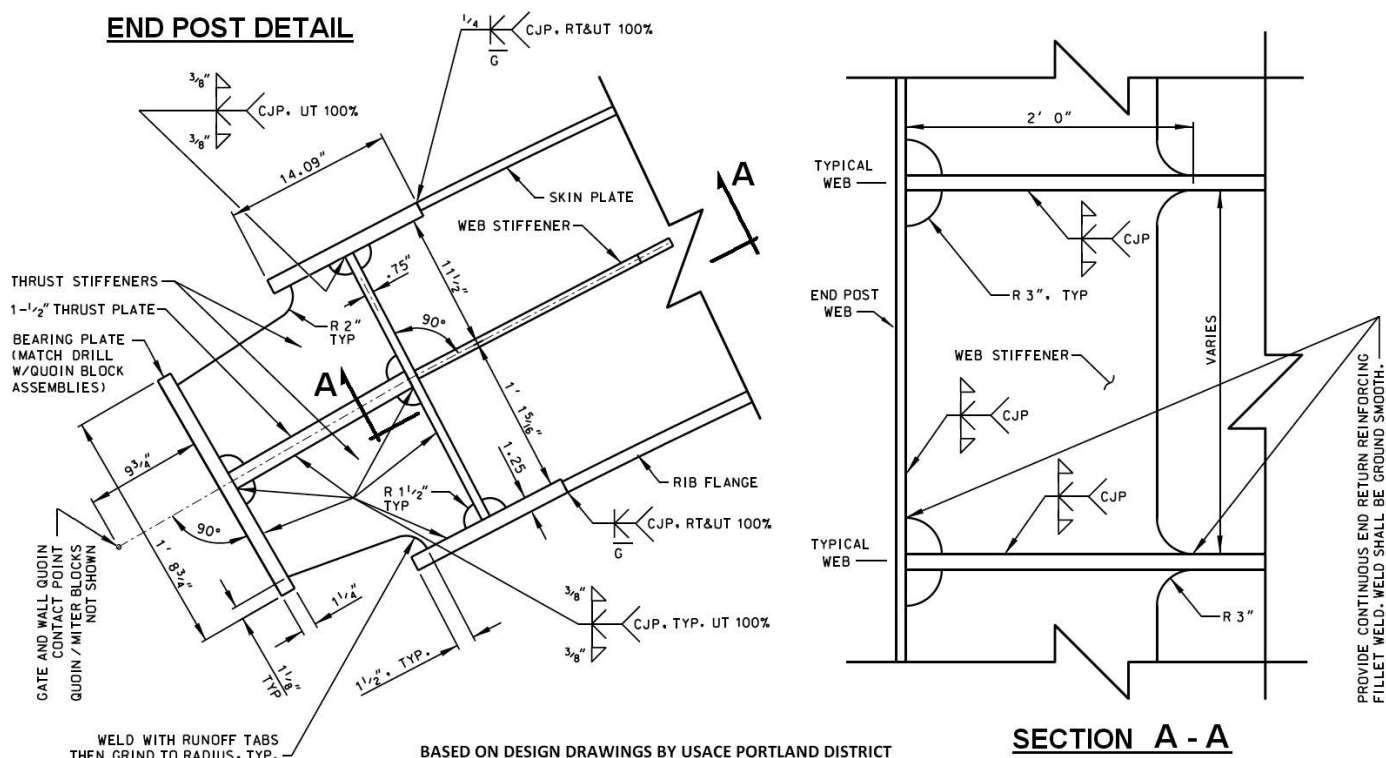
Rys. 7. Oczepy wrót śluzy w Holandii z typowymi szczegółami spoin [5]

Raport WG-189 wychodzi tu projektantom naprzeciw, podając zasady definiowania wymagań zmęzeniowych alternatywnie na 3 sposoby:

- za pomocą marginesu bezpieczeństwa w stosunku do krzywych S-N,
- za pomocą wymaganego współczynnika niezawodności β ,
- za pomocą wymaganej minimalnej długości okresu użytkowania.

Podaje się również zwięzłe zasady obliczeń trzema metodami: naprężeń nominalnych (*nominal stress method*), naprężeń miejscowych (*hot spot method*) i efektywnych naprężeń karbu (*effective notch stress method*). Najczęściej stosowaną w praktyce projektowej w Europie jest metoda naprężeń nominalnych. W dalszej części raportu, dotyczącej bardziej diagnostyki niż projektowania, można także znaleźć podstawy obliczeń rozchodzenia się rys zmęczeniowych (*crack propagation calculation*), które wychodzą już poza zakres analiz liniowych. Wszystkie te metody obliczeń mają zastosowanie nie tylko do konstrukcji hydrotechnicznych, toteż ich omówienie ma charakter ogólny i pozostawia projektantowi dużą swobodę wyboru. Zwraca przy tym uwagę porównanie współczynników bezpieczeństwa na zmęczenie (takich jak γ_{Mf} w Eurokodzie 3 [4] czy γ_{FD} w normach dla konstrukcji morskich, na przykład [11]) stosowanych do obliczeń konstrukcji „pokrewnych” stalowym zamknięciom wodnym jak platformy morskie w przemyśle petrochemicznym, turbiny wiatrowe, konwertory energii fal morskich itp.

Jak wiadomo, zdecydowana większość szkód zmęczeniowych ma miejsce, a w każdym razie jest inicjowana, na złączach konstrukcji, w tym głównie na złączach spawanych. Przy ocenie wytrzymałości zmęczeniowej metodą naprężeń nominalnych sprawą kluczową jest więc prawidłowe określenie tak zwanej kategorii szczegółów rozpatrywanych połączeń. Kategoria ta wyznacza bowiem poziom dopuszczalnego zakresu naprężeń



Rys. 8. Typowe szczegóły spoin w oczepie wrót śluzy w USA [5]

zmęczeniowych. Raport WG-189 odwołuje się w tej mierze zarówno do Eurokodu 3, jak i do norm amerykańskich, w szczególności AASHTO [1] i [2], zwracając przy tym uwagę na różnice w podejściu norm na obydwu kontynentach. Jedną z tych różnic jest fakt, że o ile Eurokod 3 [4] definiuje poziom dopuszczalnego zakresu zmienności naprężeń dla poszczególnych kategorii szczegółów, to AASHTO idzie dalej, wprowadzając zakaz stosowania połączeń najniższych kategorii oznaczonych literami D i E. Wytyczne USACE, organizacji zarządzającej drogami wodnymi w USA, podtrzymują ten zakaz [19].

Warto w tym miejscu przyrzeć się, w jaki sposób projektanci europejscy i amerykańscy dają wyraz trosce o odpowiednią wytrzymałość zmęczeniową połączeń spawanych na rysunkach technicznych wrót śluz. Przykłady tego pokazano odpowiednio na rys. 7 i 8 [5]. Na obu rysunkach przedstawiono szczegóły spoin w okolicach skrajnych odczepów tak zwanych wrót wspornych. Przykład europejski dotyczy wrót Śluzy na Mozie w Sambeek utrzymującej stosunkowo niską różnicę poziomu wody, ale o bardzo wysokiej częstotliwości śluzowań. Przykład amerykański dotyczy wrót Śluzy na rzece Columbia w The Dal-

a)



b)



c)



Rys. 9. Szczegóły wrót o dużej (a) i małej (b, c) podatności na zmęczenie [15]

les utrzymującej – przeciwnie – bardzo wysoką różnicę poziomu wody, ale przy stosunkowo niskiej częstotliwości słuzowań. Obydwa śluzы przeszły generalne remonty w drugiej dekadzie bieżącego wieku, otrzymując mniej więcej równocześnie nowe wrota.

Zauważmy, że zdecydowana większość połączeń spawanych to spoiny czołowe z pełną penetracją, w USA oznaczane skrótem CJP (*Complete Joint Penetration*). Spoiny takie mają, jak wiadomo, korzystniejsze właściwości zmęczeniowe niż spoiny pachwinowe lub spoiny z niepełną penetracją. Obydwa rysunki nie są jeszcze wprawdzie rysunkami roboczymi, mimo tego już na poziomie projektu dużą uwagę poświęcono procedurom spawania. Widać to w podanych na rys. 7 WPS (*Welding Procedure Specifications*). Procedury takie zobowiązują wykonawcę do układania spoin na odpowiednio przygotowanym materiale, w odpowiedniej kolejności, odpowiednimi elektrodami, przy odpowiednich parametrach prądu itd. Wszystkie te czynniki mają bowiem duży wpływ na wytrzymałość zmęczeniową złącza.

Zauważmy także, że na rys. 8 podano dodatkowo zakres i rodzaj wymaganych badań nieniszczących spoin. Jak widać, wymagania te są bardzo rygorystyczne i obejmują 100% długości wykonanych spoin, w większości metodą ultradźwiękową (*ultrasonic testing* UT), a dla szczególnie ważnych spoin dodatkowo metodą radiograficzną (*radiographic testing* RT). Tego rodzaju wymagania kontroli jakości odpowiadają najwyższej, czwartej klasie wykonania (*Execution Class* EXC4) według Eurokodu 0, EN 1090-2 [3]. Wymagania o podobnym zakresie sformułowano zapewne, już poza rysunkiem, dla europejskiego przykładu wrót z rys. 7. Jest to wyrazem docenienia przez autorów obydwu projektów wagi wpływu jakości wykonawstwa spoin na wytrzymałość zmęczeniową konstrukcji.

Raport WG-189 porusza także szereg aspektów utrzymania konstrukcji hydrotechnicznych w świetle ich odporności na zmęczenie. Jednym z takich aspektów jest wpływ korozji na przyspieszenie procesów zmęczeniowych. W raporcie ogólnie omówiono współzależności obydwu procesów oraz przytoczono wyniki najnowszych badań, które wskazują między innymi, że próbki w środowisku wodnym przenoszą około 2,5 razy mniej cykli naprężenia niż próbki w atmosferze, z niewielkimi tylko odchyłkami między wodą słodką a morską [18]. Podkreśla się jednak, że współzależności te są złożone, z istotnymi różnicami dla materiału rodzimego i dla spoin.

Dużo uwagi poświęcono prawidłowemu rozpoznaniu połączeń i szczegółów wrażliwych na zmęczenie i – konsekwentnie – sposobom obniżenia tej wrażliwości. Dotyczy to zarówno etapu projektowania, jak i remontów w okresie utrzymania. Jak już wspomniano przy rys. 2, jednym z takich sposobów jest redukcja karbu naprężeń przez wprowadzenie zaokrąglonych przejść na połączeniach prostopadłych pasów dźwigarów. Na rys. 9 przedstawiono jeszcze jeden szczegół takich połączeń w wersji o dużej (a) i małej (b) podatności na zmęczenie. Na zdjęciu (c) przedstawiono dodatkowo przykład stosunkowo odpornych na zmęczenie połączeń ściany piętrzącej (płyta i żebra podłużne) z pionowym dźwigarem.

Oczywiście nie wszystkie stalowe konstrukcje wodne należy projektować na obciążenia zmęczeniowe. Niektóre z tych konstrukcji doznają tylko niewielkich wahań obciążeń lub nie-

wielkiej liczby takich wahań w okresie użytkowania. Raport Grupy WG-189 nie podaje wprawdzie konkretnych wartości, poniżej których projektant zwolniony jest z obowiązku obliczeń zmęczeniowych, jednak wskazówki na ten temat można znaleźć w literaturze, a nawet w normach. Tak na przykład początek krzywych wytrzymałości zmęczeniowej w Eurokodzie 3 leży na poziomie 10^4 cykli obciążenia [4]. Autor niniejszego artykułu zaleca jednak ostrożność również przy mniejszych liczbach cykli. Skłaniają do tego wspomniane wyżej przykłady awarii zmęczeniowych wrót śluz w Niemczech w latach 80. i 90. XX wieku, opisane także w książce [16]. Do odpowiedzialnych konstrukcji, takich jak wrota śluz, dobrze jest stosować zasadę z Aneksu do normy DIN 19704 [9]. Określa ona minimalną liczbę cykli obciążenia do obliczeń projektowych na 10 dniennie, przy minimalnej liczbie dni pracy wrót w roku równej 300. Zleceńodawca może liczby te podwyższyć, ale nie może ich obniżyć.

MONITORING, DIAGNOSTYKA I REMONTY ZMĘCZENIA

Pomimo zaawansowanych metod projektowania, wykonawstwa i utrzymania stalowych konstrukcji wodnych, awarie zmęczeniowe tych konstrukcji jednak występują. Co więcej, występują one nie tylko w konstrukcjach starych po dużych liczbach cykli naprężenia, ale i w nowych mających za sobą stosunkowo niewielkie liczby takich cykli i wykonanych ze stali o lepszej spawalności i korzystniejszych parametrach odporności na zmęczenie, takich jak równoważnik węgla (*carbon equivalent* CE), udużność, ciągliwość i plastyczność. Przykłady tego można znaleźć w licznych publikacjach, między innymi w [13].

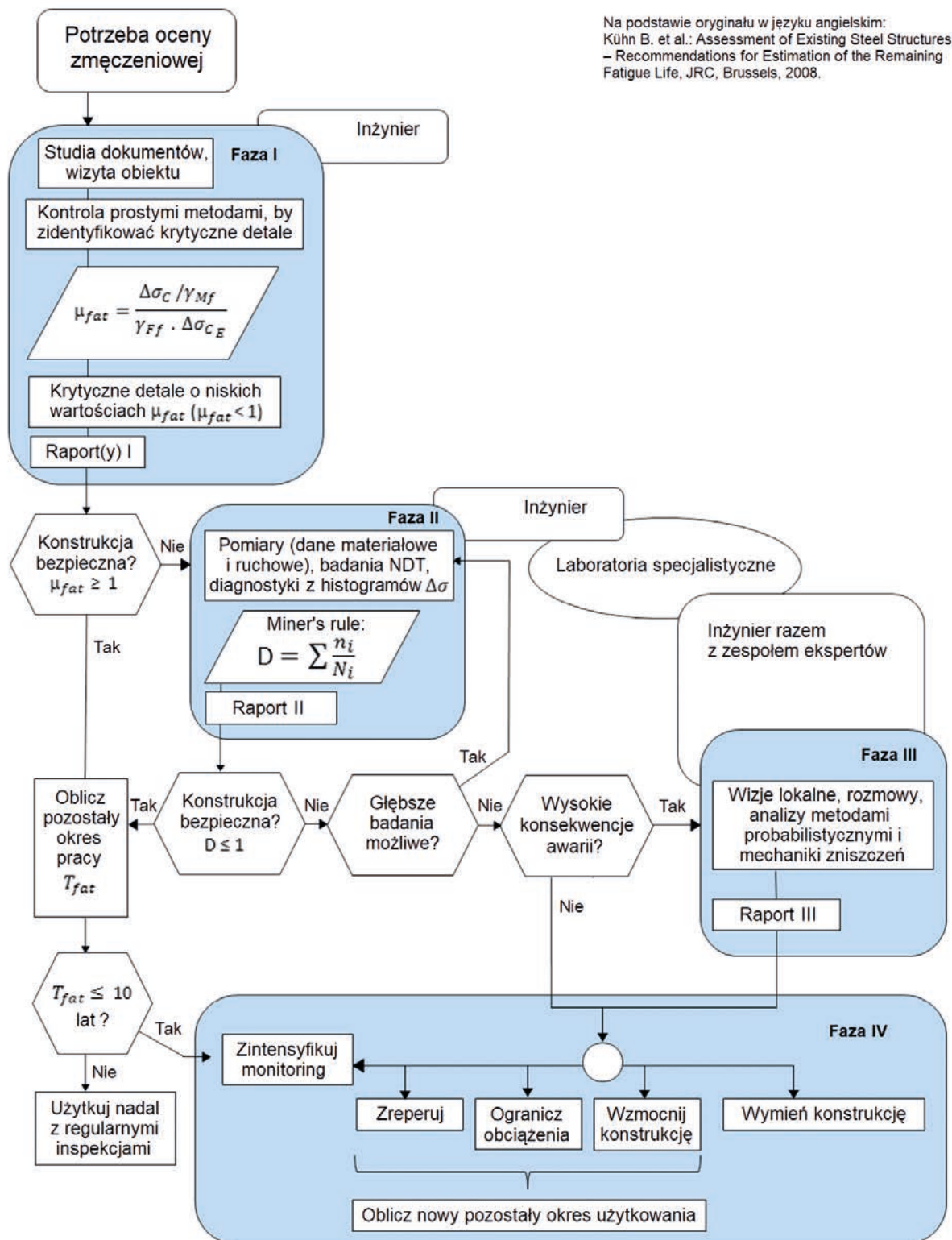
Szczególne znaczenie nabiera zatem drugie z pytań postawionych wyżej w tym artykule, a więc jak skutecznie usuwać szkody zmęczeniowe, gdy te jednak wystąpią. Raport Grupy Roboczej WG-189 [15] dokonuje przeglądu metod oceny szkód zmęczeniowych w stalowych konstrukcjach hydrotechnicznych, monitoringu takich szkód i szacunkowego określania dopuszczalnej długości pozostałego okresu użytkowania konstrukcji. Zaleca się w tej mierze stosowanie algorytmu oceny zmęczeniowej istniejących konstrukcji opracowanego przez grupę specjalistów europejskiego Zjednoczonego Centrum Badań (*Joint Research Centre*, JRC) [12]. Algorytm ten rozróżnia 4 następujące fazy takiej oceny:

- Faza I: Ocena wstępna
- Faza II: Badania szczegółowe
- Faza III: Ekspertyzy specjalistyczne
- Faza IV: Przedsięwzięcia korygujące.

Algorytm przedstawiono na rys. 10 w tłumaczeniu autora na język polski. Wypada jednak zaznaczyć, że – podobnie jak Eurokod 3 [4] – również i ten algorytm nie został opracowany z myślą o konstrukcjach hydrotechnicznych, lecz w pierwszym rzędzie dla konstrukcji mostowych. Jak już wcześniej podkreślono, tak obciążenia zmęczeniowe, jak i warunki pracy i utrzymania konstrukcji hydrotechnicznych zasadniczo różnią się od tych dla mostów (patrz tabl. 2). W praktyce będzie to również miało pewien wpływ na zakres działań w kolejnych fazach algorytmu.

Jedną z głównych różnic jest fakt, że – jak wspomniano w tabl. 2 – inspekcje konstrukcji hydrotechnicznych są bardzo trudne, a więc z reguły będą miały bardziej powierzchniowy charakter i rzadszą częstotliwość niż inspekcje zmęczeniowe mostów stalowych. Podobnie rzecz wygląda z monitoringiem mimo znacznego postępu w rozwoju metod zdalnego monitoringu w ostatnich latach. Zależnie od konkretnej sytuacji może

to więc być powodem, aby właściciel obiektu zdecydował się przejść do Fazy IV, czyli podjąć przedsięwzięcia korygujące, wcześniej niż na 10 lat przed upływem obliczonego okresu użytkowności konstrukcji. Za taką decyzją przemawiałoby też zaliczenie konstrukcji hydrotechnicznych do obiektów o dużych konsekwencjach awarii, jak również przyjęcie niezależnego od inspekcji bezpiecznego okresu użytkowania, patrz rys. 5.



Rys. 10. Ocena zmęczeniowa istniejących konstrukcji [12]

Mimo dość powszechnego obecnie stosowania koncepcji bezpiecznego okresu użytkowania, także w stalowych konstrukcjach wodnych występuje potrzeba diagnostyki i reperacji szkód zmęczeniowych. Może ona wystąpić jeszcze w przewidzianym okresie użytkowania (na przykład na skutek zmiany obciążeń lub innych warunków) lub po upływie tego okresu, gdy właściciel konstrukcji, zadowolony z jej pracy, zechce ten okres przedłużyć. W Raporcie WG-189 poświęcono również uwagę problematyce diagnostyki i reperacji szkód zmęczeniowych.

Jak widać z algorytmu na rys. 10, diagnostyka zmęczenia ma miejsce w każdej z pierwszych trzech faz. Jej metody zmieniają się jednak z prostych szacunków dla jednego dominującego zakresu naprężeń, poprzez bardziej złożone i oparte na rzeczywistych danych ruchowych obliczenia, na przykład przy użyciu zasady Palmgren-Minera [5], aż do obliczeń opartych na teorii

prawdopodobieństwa i mechanice zniszczeń. Te ostatnie obejmują analizy rozprzestrzeniania się rys zmęczeniowych (*crack propagation*). W Raporcie podano w dużym skrócie główne wzory i założenia takich analiz oraz pozycje literatury poświęcające temu tematowi więcej miejsca.

Jak zaznaczono w tabl. 2, naprawa rys zmęczeniowych w stalowych konstrukcjach hydrotechnicznych jest trudna. Jej celowość bywa również częściej kwestionowana w takich konstrukcjach niż w stalowych mostach. Ponieważ jednak alternatywa, czyli budowa nowych wrót śluzy, często okazuje się droższa i nie mieści się w budżecie lokalnego zarządu dróg wodnych, reperacje takie jednak prowadzi się. Robi się to nierzadko ze świadomością, że odwołają one tylko problem w czasie, nie stanowiąc ostatecznego rozwiązania.



Rys. 11. Przykłady napraw rys zmęczeniowych we wrótach śluz: a, b) nieudana naprawa przez wiercenie otworu na końcu rysy; c, d) naprawa nakładkami mocowanymi na śruby sprężające

Raport Grupy Roboczej WG-189 wymienia następujące metody naprawy rys zmęczeniowych, powołując się na opracowanie [14]:

- wiercenie otworów na końcach rys przez całą grubość,
- usuwanie powierzchniowych rys przez całą grubość drogą szlifowania,
- spawanie naprawcze po płytkiej obróbce powierzchni (nadspawanie rysy),
- spawanie naprawcze po pełnym usunięciu rysy,
- wzmocnienie zarysowanego elementu (nakładki spawane, mocowane na śruby itp.) z usunięciem lub bez usunięcia rys,
- usunięcie rys, spawanie naprawcze i dodatkowe usztywnienia redukujące naprężenia,
- usunięcie rys, spawanie naprawcze i obróbka powierzchni spoin poprawiająca ich wytrzymałość zmęczeniową,
- usunięcie zarysowanego elementu i zastąpienie go elementem przeprojektowanym,
- nakładki mocowane śrubami sprężającymi.

Dwa przykłady metod z tej listy przedstawiono na rys. 11. W raporcie bliżej omówiono tło obydwu przykładów. Przytoczono także opublikowaną wcześniej przez JCR [12] ocenę stosowanych metod napraw zależnie od charakteru obciążeń i innych przyczyn rys zmęczeniowych. Trzeba jednak nadmienić, że autorzy raportu dość sceptycznie odnoszą się do większości tych metod napraw, kwalifikując je jako „kupowanie czasu”, a nie trwałe rozwiązanie problemu.

UWAGI KOŃCOWE

Jak już wspomniano stalowe konstrukcje hydrotechniczne stanowią raczej niewielki segment rynku konstrukcji stalowych. Mają one jednak własną specyfikę, która pod wieloma względami wymaga innego – zwykle bardziej rygorystycznego – podejścia zarówno ze strony projektanta, jak i właściciela czy instytucji zarządzającej infrastrukturą wodną. Jednym z takich względów jest problematyka zmęczenia.

Istotne jest zatem, aby inżynierowie zaangażowani w projektowanie lub utrzymanie takich konstrukcji z jednej strony korzystali z doświadczeń zdobytych na temat zmęczenia przy innych rodzajach konstrukcji stalowych, a z drugiej strony byli w stanie relatywizować te doświadczenia w stosunku do warunków pracy konstrukcji hydrotechnicznych. Raport Grupy Roboczej PIANC WG-189 jest, jak gdyby, przewodnikiem w tym zakresie. Podaje on wiele praktycznych danych, metod i norm dotyczących zmęczenia, wraz z omówieniem, jak wiedza ta przedstawia się w relacji do konstrukcji wodnych oraz jak z niej korzystać.

Żegluga śródlądowa w Polsce ma na razie – poza turystyką – bardzo niewielkie znaczenie, obsługując jedynie 0,2% przewozów towarowych [10]. Jednak pozycja tej żeglugi jako elementu zrównoważonego rozwoju będzie niewątpliwie rosła. Sprzyja tam także polityka Unii Europejskiej nakładająca na Polskę konkretne zobowiązania w tej mierze. Jednym z czołowych orędowników rozwoju żeglugi śródlądowej w naszym kraju był niedawno zmarły profesor Adam Bolt [7], którego pamięci poświęcony jest ten artykuł. Należy spodziewać się, że wraz

z rozwojem żeglugi wzrośnie również częstotliwość służowań i innych operacji, w które zaangażowane są ruchome stalowe konstrukcje hydrotechniczne. Problematyka zmęczenia tych konstrukcji może zatem także w Polsce stać się bardzo aktualna. Autor ma nadzieję, że niniejszy artykuł przybliży kolegom w kraju tę problematykę.

LITERATURA

1. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications 2012. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC 2012.
2. AASHTO/AWS D1.5M/D1.5:2015, Bridge Welding Code. American Association of State Highway and Transportation Officials / American Welding Society, Washington DC / Miami FL, November 3, 2015.
3. CEN: EN 1090-2: (2008), Eurocode: Execution of steel structures and aluminium structures – Part 2: Technical requirements for steel structures. Brussels 2008.
4. CEN: EN 1993-1-9 (2005), Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-9 Fatigue. European Committee for Standardization, Brussels, May 2005.
5. Daniel R. A., Paulus T. M.: Lock Gates and Other Closures in Hydraulic Projects. Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford UK – Cambridge MA/USA, 2019.
6. Daniel R. A.: Mitre gates in some recent lock projects in the Netherlands. Stahlbau 69 (2000), Heft 12, 952-964.
7. Dembicki E.: Dr. hab. inż. Adam Bolt, prof. PG. Strona internetowa Polskiego Komitetu Geotechniki, https://www.geotechnika.org.pl/?page_id=1065.
8. Deutscher M.: Der Eurocode für den Stahlbau. BAW-Kolloquium Eurocodes für den Verkehrsbau, Karlsruhe, October 2012.
9. DIN 19704: Stahlwasserbauten, Teil 1: Berechnungsgrundlagen. Teil 2: Bauliche Durchbildung und Herstellung. Mai 1998.
10. GUS: Żegluga śródlądowa w Polsce w latach 2018 i 2019. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa, Szczecin 2020.
11. ISO 19902:2007: Petroleum and natural gas industries – Fixed steel offshore structures. first edition, ISO, Geneva 2007 (obecna wersja: 2020).
12. Kühn B. et al.: Assessment of Existing Steel Structures – Recommendations for Estimation of the Remaining Fatigue Life, JRC, Brussels 2008.
13. Meinhold W.: Betriebsfestigkeit von Stahlwasserbauten – Anforderungen und Problemstellungen bei Instandsetzung und Neubau. BAW-Kolloquium, Hannover, 23 April 2002.
14. Petershagen H., Wernicke R.: Gestaltung und Betriebsfestigkeit von Unterwasser Reparaturschweißungen an Offshore-Konstruktionen. Bericht-Nr. 595 der Arbeitsbereiche Schiffbau der TUHH, Hamburg 1998.
15. PIANC: Fatigue of Hydraulic Steel Structures. Raport Grupy Roboczej WG-189, PIANC Inland Navigation Commission (InCom), Brussels 2020.
16. Schmaußer G., Nölke H., Herz E.: Stahlwasserbauten – Kommentar zu DIN 19704. Ernst & Sohn, Berlin 2000.
17. SolidWorks: Preventing Mechanical Failure. Technical paper, Dassault Systèmes SolidWorks Corp., Concord (MA), 2009.
18. Ummenhofer Th., Gkatzogiannis S., Weidner Ph.: Einfluss der Korrosion auf die Ermüdungsfestigkeit von Konstruktionen des Stahlwasserbaus. BAW Kolloquium, Karlsruhe, 8-9 Februar 2017.
19. USACE: Design of Hydraulic Steel Structures, ETL 1110-2-584 engineering and design manual. US Army Corps of Engineers, Washington DC, 30 June 2014.
20. Wöhler A.: Versuche zur Ermittlung der auf die Eisenbahnwagen-Achsen einwirkenden Kräfte und der Widerstandsfähigkeit der Wagen-Achsen. Zeitschrift für das Bauwesen 10 (1860), 583-616.