

# Wpływ imperfekcji wykonawczych konstrukcji kolejowych mostów stalowych na ich nośność doraźną i zmęczeniową

Adam Wysokowski<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Zakład Dróg i Mostów, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Uniwersytet Zielonogórski,  
e-mail: awysokowski@infra-kom.eu

## Streszczenie:

W ostatnich latach w naszym kraju modernizowanych i przebudowywanych jest wiele odcinków linii kolejowych w tym głównie magistralnych. Większa część z nich dostosowywana jest do kolei o zwiększonych prędkościach. Wiąże się to z przebudową lub budową obiektów mostowych w tym mostów stalowych. Przedmiotowy referat dotyczy imperfekcji wykonawczych przebadanych przez autora konstrukcji mostów stalowych, które w ostatnim okresie zrealizowane zostały w ciągu wspomnianych wcześniej modernizowanych magistralnych linii kolejowych. Opisane imperfekcje polegają m.in. na odchyłkach geometrycznych konstrukcji od założonego projektu. Dotyczy to również wad spoin o różnym charakterze, które wystąpiły w newralgicznych elementach konstrukcji mostu.

Celem referatu jest wykazanie wpływu imperfekcji na nośność doraźną i zmęczeniową konstrukcji mostowych. Autor wykazał, że stwierdzone imperfekcje mają istotny wpływ na trwałość zmęczeniową – szczególnie dotyczy to wad spoin, natomiast dużo mniejsze jest ich znaczenie dla nośności doraźnej.

Analizy te autor wykonał w oparciu o sposoby teoretyczne, opracowane we wcześniejszych swoich pracach. Przy analizie posłużono się nowymi normami do projektowania konstrukcji stalowych z grupy eurokodów.

**Słowa kluczowe:** stalowe mosty kolejowe, imperfekcje, wady spoin, nośność, zmęczenie

## 1. Wprowadzenie

Jednym z ważniejszych zagadnień budownictwa mostowego jest bezpieczeństwo tych konstrukcji [9]. Jego określenie stanowi podstawowy warunek dopuszczenia obiektu do użytkowania. Dotyczy to wielu obecnie wykonywanych obiektów mostowych związanych z modernizacją i przebudową wielu odcinków linii kolejowych w tym magistralnych.

Cześć z nich, co ważne, dostosowywana jest do kolei o zwiększonych prędkościach. Duża część z tych obiektów to mosty i wiadukty o konstrukcji stalowej. Projektowane i wykonywane są one, a także dopuszczane do eksploatacji w oparciu o odpowiednie normy [16], [19], [20]. Pomimo specjalnego reżimu technologicznego dla tego typu konstrukcji nie daje się, mimo wszystko, wyeliminować imperfekcji wykonawczych występujących na etapie wykonywania samej konstrukcji w wytwórni, na etapie montażu, bądź nawet na etapie eksploatacji. Ze względu na wagę tego problemu warto w dalszym ciągu zgłębiać tę problematykę. Tytułowe zagadnienie najlepiej będzie, zdaniem autora referatu omówić na przykładach konkretnych, zrealizowanych konstrukcji mostowych.

## 2. Imperfekcje wykonawcze dla przebadanych konstrukcji mostów

W trakcie wykonywanych prac badawczych dla zrealizowanych konstrukcji mostowych autor stwierdził występujące imperfekcje wykonawcze w rzeczywistych konstrukcjach mostowych. Wady te stwierdzono w wyniku prac naukowo-technicznych pod kierunkiem autora wykonanych zarówno przez Zakład Dróg i Mostów Uniwersytetu Zielonogórskiego jak i jednostkę konsultingową Infrastruktura Komunikacyjna Sp. z o.o. – Żmigród.

Dotyczyły one zarówno odchyłek geometrycznych, jak również imperfekcji występujących w połączeniach spawanych. Ważniejsze imperfekcje, które posłużyły do dalszych analiz, zostały przedstawione w dalszej części referatu.

## 2.1. Opis ogólny przebadanych mostów

Tytułowe zagadnienie autor omawia na przykładach konkretnych zrealizowanych konstrukcji mostowych. Są to trzy stalowe konstrukcje mostowe dla potrzeb niniejszego referatu i dla ułatwienia przeprowadzonych analiz zostały oznaczone jako konstrukcje „A”, „B” i „C”:

**MOST A** - Obiekt mostowy położony w ciągu dwutorowej linii kolejowej. Konstrukcja przeseł belkowa pięcioprzęsłowa ciągła z pomostem ortotropowym. Długości poszczególnych przeseł wynoszą ok. 12,0 m. Niezależne przęśla pod każdy tor.

**MOST B** - Obiekt mostowy położony w ciągu dwutorowej linii kolejowej. Konstrukcja przeseł belkowa, wolnopodparta o konstrukcji zespolonej. Długość przęśla ok. 18,0 m. Niezależne przęśla pod każdy tor.

**MOST C** - Obiekt mostowy trzyprzęsłowy, ciągły. Konstrukcja belkowa z dźwigarów blachownicowych z płytą żelbetową zespoloną. Długości poszczególnych przeseł ok. 30,0 m.

## 2.2. Imperfekcje geometryczne

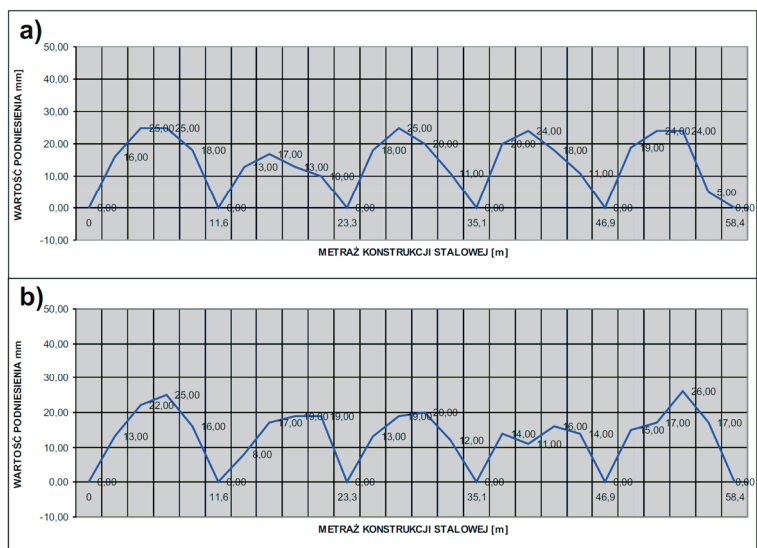
W trakcie przeprowadzonych przeglądów i pomiarów obiektów mostowych stwierdzono m.in. występowanie odchyłek geometrycznych. Ważniejsze z nich, które posłużyły do dalszych analiz przedstawiono poniżej.

W przypadku mostu „A” stwierdzono imperfekcje geometryczne na całej długości dźwigarów. Dotyczy to całego dźwigara blachownicowego. Na rysunku 1 zestawiono wartości pomierzonych odchyłek na długości mostu dla pasa dolnego, zarówno dźwigara od strony górnej wody, jak i od strony wody dolnej.

W przęśle mostu oznaczonego jako „B” stwierdzono brak podniesienia wykonawczego obiektu, a nawet ok. 15 milimetrowe jego ugięcie pod obciążeniem stałym.

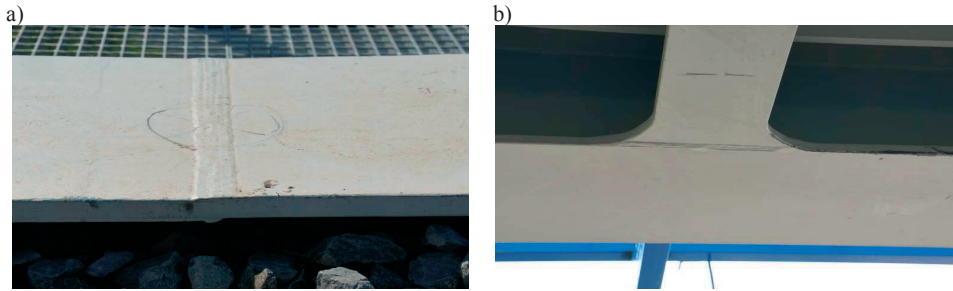
Przykładowy widok dźwigara ilustrujący tą imperfekcję dla mostu „B” pokazano na rysunku nr 2.

W przypadku mostu „C”, podobnie jak dla mostu „A”, stwierdzono imperfekcje na długości dźwigarów tej ciągłej konstrukcji. Rysunek 3 ilustruje wartości pomierzonych odchyłek pasów górnych dźwigarów głównych.



Rys. 1. Wartości pomierzonych imperfekcji na długości mostu A w pasach dolnych dźwigarów głównych: a) od strony górnej wody, b) od strony dolnej wody

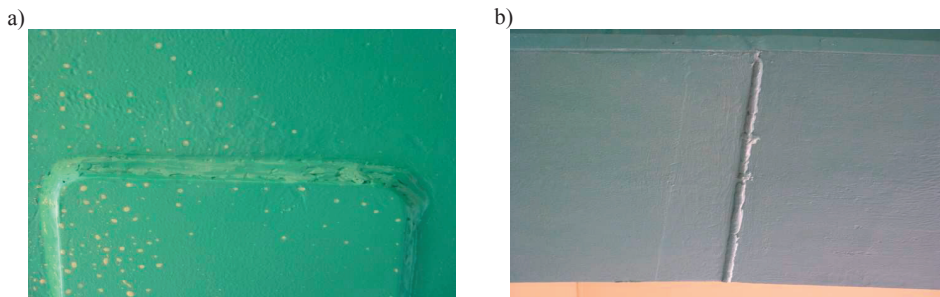




Rys. 4. Wadliwe połączenia spawane dla przebadanego mostu A: a) Spoina poprzeczna pasa górnego dźwigara głównego, b) Spoina łącząca pas dolny poprzeczniczy z pasem dolnym dźwigara



Rys. 5. Wadliwa spoina łącząca pas dolny poprzeczniczy z pasem dolnym dźwigara dla przebadanego mostu B



Rys. 6. Wadliwe połączenia spawane przebadanego mostu C: a) Spoina pochwinowa nakładki pasa dolnego dźwigara głównego, b) Spoina poprzeczna pasa dolnego dźwigara głównego

### 3. Analiza wpływu pomierzonych imperfekcji na nośność

Poniżej w punktach 3.1 i 3.2 zestawiono wyniki analizy wpływu pomierzonych imperfekcji na nośność doraźną i nośność zmęczeniową wszystkich trzech analizowanych konstrukcji mostowych.

#### 3.1. Wpływ pomierzonych imperfekcji na nośność doraźną

Dla rozpatrywanych konstrukcji mostowych przeprowadzono analizy wpływu stwierdzonych imperfekcji na nośność doraźną. Na podstawie projektów technicznych dla przedmiotowych konstrukcji przeszło przeprowadzono obliczenia statyczne, bez i z uwzględnieniem stwierdzonych imperfekcji. Ponadto przeprowadzone zostały badania tych obiektów pod próbnym obciążeniem – tak statycznym, jak i dynamicznym. Zwracano przy tym szczególną uwagę na możliwy wpływ stwierdzonych imperfekcji na nośność poszczególnych elementów konstrukcji, jak i przeszło jako całości.

Wybrane wyniki tych badań zestawiono w tablicy 1.

Przeprowadzone analizy jak i wyniki badań wykazały, że stwierdzone imperfekcje w ich konstrukcjach nie wykazały znaczącego wpływu na nośność doraźną.

Ponadto w przypadku mostu „A” stwierdzono nawet, niewielki wzrost nośności z uwagi na wyniesienie dźwigarów głównych.

Tablica 1. Zestawienie wyników analiz i badań nośności doraźnej dla przebadanych mostów

KONSTRUKCJA MOSTOWA	BADANY ELEMENT / SCHEMAT	PRZEMIESZCZENIE POMIERZONE	PRZEMIESZCZENIE DOPUSZCZALNE	
		[mm]	[mm]	
MOST A	Dźwigary główne	W wyniku przeprowadzonych analiz na skutek stwierdzonej imperfekcji geometrii dźwigara nastąpił wzrost jego nośności $\Delta M = + 0,11\%$		
MOST B	Tor nr I	dźwigar skrajny	2,87	5,70
		dźwigar środkowy	3,57	5,70
	Tor nr II	dźwigar skrajny	2,87	5,70
		dźwigar środkowy	3,30	5,70
MOST C	Schemat obciążeń 1	8,32	9,43	
	Schemat obciążeń 2	5,70	6,04	
	Schemat obciążeń 3	14,15	14,20	
	Schemat obciążeń 4	8,55	8,87	

### 3.2. Wpływ stwierdzonych imperfekcji na nośność zmęczeniową

W celu przeprowadzenia analizy wpływu imperfekcji połączeń spawanych na ich nośność zmęczeniową, autor wykorzystał aktualne przepisy normowe w tym zakresie [17], [18] jak też wyniki wcześniejszych swoich prac na ten temat [11],[12].

Według tej aktualnej normy, (wdrożonej i coraz częściej stosowanej w praktyce) PN-EN 1993-2 [17],[18] z grupy eurokodów ocena stanu zmęczenia rozpatrywanego elementu konstrukcji dla normowego „okresu życia” powinna być dokonana w oparciu o poniższe wyrażenia, związane z naprężeniami normalnymi, bądź ścinającymi:

$$\gamma_{Ff} \Delta \sigma_{E_2} \leq \Delta \sigma_c / \gamma_{Mf} \quad (1)$$

gdzie:

$\gamma_{Ff}$  – częściowy współczynnik dla obciążeń zmęczeniowych,  
 $\Delta \sigma_{E_2}$  – równoważna amplituda naprężeń odniesiona do  $2 \times 10^6$  cykli zmian naprężeń stacjonarnych:

$$\Delta \sigma_{E_2} = \lambda \Phi_2 \Delta \sigma_p \quad (2)$$

gdzie:

$\lambda$  – jest współczynnikiem uszkodzenia równoważnego (zależnym od typu dźwigara, długości linii wpływu, intensywności ruchu, przewidywanego okresu eksploatacji mostu, itp.),

$\Phi_2$  – jest współczynnikiem dynamicznym równoważnego uszkodzenia,

$\Delta \sigma_p$  – jest projektowym zakresem naprężeń,

$\Delta \sigma_c$  – wytrzymałość zmęczeniowa odczytana z tabel (krzywych wytrzymałości zmęczeniowej) dla występującego typu karbu [17],

$\gamma_{Mf}$  – częściowy współczynnik bezpieczeństwa dla wytrzymałości zmęczeniowej.

W celu przeprowadzenia odpowiednich analiz trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcji mostów dla potrzeb niniejszego referatu wygodniej jest skorzystać z uprzednio opracowanej przez autora metody przedstawionej we wcześniejszych jego pracach [2],[5],[6].

Metoda ta opiera się na tych samych założeniach co opisany wyżej w zakresie zmęczenia sposób normowy (norma PN-EN 1993-2).

Autor korzysta przy tym z wcześniej wyprowadzonych przez siebie wzorów w tym z poniższego wyprowadzonego w pracy [7] na określenie trwałości zmęczeniowej  $T$  (w latach):

$$T = \frac{10^a}{\Delta\sigma_n^m \cdot 365 \cdot N_{\Delta n}^d} \quad (3)$$

gdzie:

- $T$  – trwałość zmęczeniowa mostu wyrażona w latach,
- $a$  – parametr krzywej wytrzymałości zmęczeniowej (zależny od typu karbu) wrażliwość zmęczeniowa,
- $\Delta\sigma_n$  – zakres naprężeń wywołany obciążeniem normowym,
- $N_{\Delta n}^d$  – równoważna zastępcza liczba cykli o zakresach naprężeń wywołanych obciążeniem normowym na dobę,
- $m$  – współczynnik nachylenia krzywych zmęczeniowych.

Porównując teoretyczną trwałość normową  $T_n$  (jaką założył projektant w PT) z trwałością rzeczywistą  $T_1$  analizowanych spoin z imperfekcjami jakościowymi, otrzymujemy:

$$\frac{T_1}{T_n} = \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_n}\right)^m \quad (4)$$

Korzystając z opisanego sposobu wyznaczania spadku trwałości zmęczeniowej przeprowadzono odpowiednie obliczenia.

Obliczenia te wykonano dla kilku wybranych najniekorzystniejszych imperfekcji spoin w konstrukcjach obiektów mostowych w miejscach będących przedmiotem analiz.

Dla czytelności przeprowadzanych rozważań do obliczeń wybrano jedynie spoiny przedstawione na rysunkach 4 – 6 w głównych elementach konstrukcji analizowanych mostów.

Wyniki obliczeń spadku normowej trwałości zmęczeniowej zestawiono w tablicy 2.

Tablica 2. Zestawienie imperfekcji połączeń spawanych dla przebadanych mostów wraz z wyznaczonymi dla nich spadkami trwałości normowej

KONSTRUKCJA MOSTOWA	RODZAJ I MIEJSCE ZAKWESTIONOWANEJ SPOINY	KATEGORIA ZMĘCZENIOWA ELEMENTU WG PN-EN 1993-9		SPADEK NORMOWEJ TRWAŁOŚCI
		WEDŁUG		TRWAŁOŚCI $T_1/T_n$ [%]
		PROJEKTU	WYKONANIA	
MOST A	Spoina poprzeczna pasa górnego dźwigara głównego (rys. 1a)	112	90	48,1
	Spoina podłużna łącząca pas dolny poprzeczniczy z pasem dolnym dźwigara (rys. 1b)	90	71 (56)	50,9 (75,9)
MOST B	Spoina podłużna łącząca pas dolny poprzeczniczy z pasem dolnym dźwigara (rys. 2)	90	56	75,9
MOST C	Spoina pachwinowa nakładki pasa dolnego dźwigara głównego (rys. 3a)	50	36	62,7
	Spoina poprzeczna pasa dolnego dźwigara głównego (rys. 3b)	90	50	82,8

Analizując zestawione wyniki można stwierdzić bardzo duże spadki trwałości zmęczeniowej w stosunku do tych założonych przez projektanta. Wynoszą one dla tych wadliwych spoin od ok. 48 % dla zakwestionowanej spoiny w moście „A” do nawet ponad 82% dla spoiny poprzecznej pasa dolnego dźwigara głównego w moście „C”.

Oznacza to, że występuje realne niebezpieczeństwo zaistnienia pęknięć zmęczeniowych w tych spoinach nawet po kilkunastoletnim okresie eksploatacji. Zależać

to będzie oczywiście od „wyteżenia” eksploatacyjnego rozpatrywanych elementów konstrukcyjnych.

Wyteżenie to wiąże się bezpośrednio z częstotliwością i wielkością obciążeń. Nie bez znaczenia będzie tu możliwość przejazdu pociągów ponadnormatywnych.

Należy jednak wziąć pod uwagę fakt, co analizował autor w swojej pracy [10], że rzeczywiste naprężenia w konstrukcjach są znacznie mniejsze od projektowanych z uwagi na nieuwzględnianie w obliczeniach statycznych projektu wielu elementów jego wyposażenia.

#### 4. Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone na potrzeby niniejszego referatu analizy z wykorzystaniem wyników wykonanych uprzednio przeglądów, pomiarów i badań przedmiotowych mostów wykazały, że:

- Stwierdzone imperfekcje geometryczne – mimo swojej istotności – nie mają znaczącego wpływu na ograniczenie nośności doraźnej, i tak wykonane obiekty nie wykazały konieczności ograniczenia nośności projektowej. Jest oczywistym, że imperfekcje te mają znaczenie dla estetyki tak wykonanych konstrukcji mostowych, a często mogą mieć również wpływ na stan graniczny ich użytkowania.
- Imperfekcje jakościowe spoin stwierdzone w obiektach będących przedmiotem przeglądów, mają duży wpływ na trwałość zmęczeniową dla elementów konstrukcji, w których stwierdzono te wady. Jest to zgodne z przewidywaniami na podstawie doświadczeń autorów wielu prac [1],[3],[4],[8],[15].

Natomiast w tym przypadku istotna jest znacząca wielkość przewidywanych spadków trwałości zmęczeniowej dochodząca w skrajnym przypadku nawet do ponad 80 %.

Bagatelizowanie tego zagadnienia, co czasem według doświadczeń autora ma miejsce, szczególnie przy intensywnym, cyklicznym eksploatacyjnym obciążeniu kolejowym, może prowadzić do pęknięć zmęczeniowych, a tym samym koniecznych awaryjnych napraw.

Zdaniem autora należy prowadzić dalsze intensywne prace w zakresie przedmiotowej tematyki, gdyż właściwe wykonywanie obiektów podnosi niewątpliwie bezpieczeństwo użytkowników i wydłuża trwałość zmęczeniową konstrukcji mostów stalowych.

W pracach tych może być pomocne zbieranie i kompletowanie informacji na temat imperfekcji będących przedmiotem referatu i monitoring stwierdzonych przypadków in-situ.

W dalszej ocenie rzeczywistego wpływu imperfekcji wykonawczych na rzeczywistą nośność doraźną i zmęczeniową mogą być użyteczne metody i algorytmy opracowane we wcześniejszych pracach autora [7],[8],[13],[14].

#### Literatura

- 1 Czerepak A., Czudek H., Pryga A., Wysokowski A. „Metoda szacowania wpływu korozji na nośność konstrukcji stalowych drogowych obiektów mostowych”, Zalecenia GDDKiA, IBDiM, Żmigród 2003
- 2 Czudek H., Wysokowski A. Trwałość mostów drogowych. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2005r.
- 3 Rykałuk K. Pęknięcia w konstrukcjach stalowych. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 2000r.
- 4 Wichtowski B. Wnioski z badań blachownicowych mostów kolejowych z pęknięciami w złączach spawanych. Inżynieria i Budownictwo, nr 10/2000r.
- 5 Wysokowski A. Durability Aspects in the Design of Steel Highway Bridges. IABSE Symposium „Durability of Structures”. Lisbon 1989, vol. 51
- 6 Wysokowski A. Propozycja sprawdzania trwałości zmęczeniowej w nowelizowanej normie projektowania mostów stalowych PN/S-10052. Inżynieria i Budownictwo nr 7-8/1995, s. 425-427
- 7 Wysokowski A. Trwałość mostów stalowych w funkcji zjawisk zmęczeniowych i korozyjnych. IBDiM Studia i Materiały, Zeszyt nr 53, Warszawa 2001r.

- 8 Wysokowski A. Simulation analysis of fatigue strength in steel highway bridges. Civil and Environmental Engineering Reports, Uniwersytet Zielonogórski No 1 2005r.
- 9 Wysokowski A. Bezpieczeństwo stalowych mostów drogowych. Magazyn Autostrady nr 4/2008r.
- 10 Wysokowski A. Rezerwy trwałości zmęczeniowe w konstrukcjach mostów stalowych. Wrocławskie dni mostowe. Trwałość obiektów mostowych. Politechnika Wroclawska. Wrocław, listopad 2012r.
- 11 Wysokowski A. Effect of Fatigue on Durability of Steel Highway Bridges. Archives of Civil Engineering, Vol. 48, nr 1, s. 59—91, PAN Warszawa 2002r.
- 12 Wysokowski A. Method of Assessing fatigue hazard to Steel Railway Bridges. Engineering Transactions Vol.49, iss.4, s.459- 483, PAN Warszawa 2001r.
- 13 Wysokowski A., Ławniczak M. Zalecenia dotyczące oceny stanu powłok malarskich i korozji w konstrukcjach stalowych mostów drogowych. IBDiM. Informacje i instrukcje. Zeszyt 52. Warszawa 1995r.
- 14 Wysokowski A. Howis J, Wagner J. Przykład praktycznego uwzględniania zjawisk korozji i zmęczenia dla zabytkowego mostu zespolonego. Konferencja Naukowo-Techniczna Zespolone Konstrukcje Mostowe. Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej s. 564-574, Kraków 2009r.
- 15 Zobel H., Alkhafaji T., Wróbel M. Określanie trwałości mostów drogowych. Mosty nr 2/2007r.
- 16 PN-EN 1990:2004 Podstawy projektowania konstrukcji.
- 17 PN-EN 1993-1-9:2007 Eurokod 3 – Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-9: Zmęczenie.
- 18 PN-EN 1993-2:2006 Eurokod 3 – Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 2: Mosty stalowe.
- 19 PN-EN 1090-1:2009 Wykonanie konstrukcji stalowych i aluminiowych - Część 1: Zasady oceny zgodności elementów konstrukcyjnych.
- 20 PN-EN 1090-2:2008 Wykonanie konstrukcji stalowych i aluminiowych - Część 2: Wymagania techniczne dotyczące wykonania konstrukcji stalowych

## **Influence of executive imperfections of railway steel bridges construction on operational capacity and fatigue capacity**

**Adam Wysokowski<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Road and Bridges Department, Faculty of Civil and Environmental Engineering, University of Zielona Góra, e-mail: awysokowski@infra-kom.eu*

**Abstract:** In recent years, in our country are modernized and rebuilt several sections of railway lines, mainly main lines. The greater part is adapted to increased speeds. However, such an adaptation involve the reconstruction or construction of new bridges including steel ones. The paper concerns the executive imperfections of constructions of steel bridges which in recent years have been built in the modernized main railway lines. These imperfections consist of, among others, the geometric imperfections from the assumed construction project. This also applies to defects in welds of various types that occur in critical elements of bridge structure.

The aim of this paper is to demonstrate the influence of imperfections on the load carrying capacity and fatigue of these structures. Author showed that the observed imperfections have a significant impact on the fatigue life - especially for weld defects, in the case of load carrying capacity their importance is much smaller.

These analyses are performed by using the theoretical methods developed in previous reports.

In the analysis new standards for the design of steel structures from Eurocodes group were used.

**Keywords:** steel railway bridges, imperfections, defects of welds, load capacity, fatigue, durability.