

PRZEGLĄD SPAWALNICTWA

# Welding

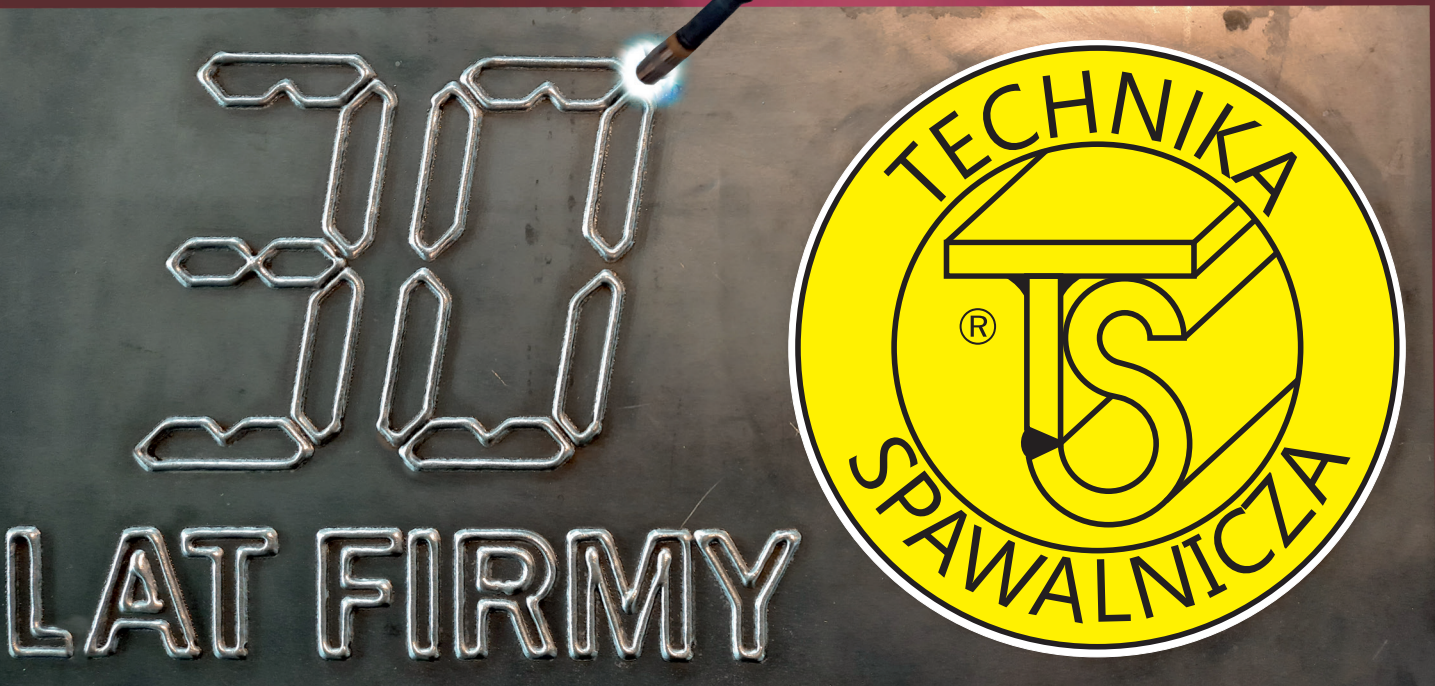
## TECHNOLOGY REVIEW

Dostępny w wersji elektronicznej na stronie: [www.simp-wydawnictwo.pl](http://www.simp-wydawnictwo.pl)



Vol. 93 Nr 3/2021

Dwumiesięcznik Naukowo-Techniczny



Cena w prenumeracie 17 zł (w tym 5% VAT)

Index 37125

PL ISSN 0033-2364

Rok założenia 1928

## REDAKTOR NACZELNY / EDITOR-IN-CHIEF

Prof. dr hab. inż. Tomasz Chmielewski – Politechnika Warszawska

## Z-CA REDAKTORA NACZELNEGO / DEPUTES EDITOR-IN-CHIEF

Mgr inż. Włodzimierz Jacek Walczak – Messer Polska;

ds. Współpracy z Przemysłem / Industry Cooperation Affairs

## SEKRETARZ / SUBMISSION OFFICER

lic. Norbert Kozłowski

## REDAKTOR / EDITOR

mgr inż. Beata Skowrońska

## REDAKTOR STATYSTYCZNY / STATISTICAL EDITOR

mgr Marcin R. Konopka

## REDAKTOR JĘZYKOWY / LANGUAGE EDITOR

Damian Bandurski

REDAKTORZY  
/ EDITORS

Prof. Dariusz Ceglarek – University of Warwick, United Kingdom

Prof. Leszek A. Dobrzański, dr h.c. – Politechnika Śląska

Prof. Ján Dúša – Institute of Materials Research, Slovak Academy of Sciences, Słowacja

Dr Mehdi Jafari Vardanjani – University of Tehran, Iran

Prof. Borut K Košec – University of Ljubljana, Faculty of Natural Science

and Engineering, Słowenia

Prof. Krzysztof Kozioł – Cranfield University, Zjednoczone Królestwo

Dr inż. Mariusz Kulczyk – Instytut Spawalnictwa w Gliwicach Akademia Nauk

Prof. Seiji Kuroda – National Institute for Materials Science, Research Center

for Structural Materials, Japonia

Prof. Adimoolam Kuppusamy Lakshminarayanan – SSN College of Engineering

Kalavakkam, Indie

Prof. Zbigniew Mirski – Politechnika Wrocławska

Prof. Dumitru Nedelcu – „Gheorghe Asachi” Technical University of Iași, Rumunia

Prof. Zbigniew Prusak – Central Connecticut State University, USA

Prof. Jacek Ślania – Instytut Spawalnictwa w Gliwicach

Dr inż. Kwiryn Wojsyk – Politechnika Częstochowska

Prof. Prasad Yarlagadda – Queensland University of Technology, Australia

Prof. Sheng Zhu – National Key Laboratory for Remanufacturing, Pekin, Chiny

MIĘDZYNARODOWA RADA PROGRAMOWA  
/ INTERNATIONAL SCIENTIFIC COMMITTEE

Prof. Jan Pilarczyk – Instytut Spawalnictwa w Gliwicach, Przewodniczący / President

Prof. Andrzej Ambroziak – Politechnika Wrocławska, Zastępca / Vice-President

Prof. Alexander I. Balitskii – National Academy of Science, Ukraina

Dr-ing. Paweł Baryliszyn – Volkswagen Aktiengesellschaft, Wolfsburg, Niemcy

Prof. Gilmar Ferreira Batalha – Polytechnic School of University Sao Paulo, Brazylia

Prof. Nikolaos Gouskos – University of Athens, Grecja

Prof. Jolanta Janczak-Rusch – EMPA, Swiss Federal Laboratories for Materials

Science and Technology, Szwajcaria

Prof. Andrzej Kolasa – Politechnika Warszawska, Polska

Prof. Valeriy D. Kubnetsov – Kyiv Polytechnical Institute, Ukraina

Prof. Jerzy Labanowski – Politechnika Gdańska, Polska

Prof. Leonid M. Lobanow – National Academy of Science, Ukraina

Prof. Jerzy Nowacki – Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Mgr inż. Bogusław Olech – Polskie Towarzystwo Badań Nieniszczących SIMP,

Oddział w Szczecinie

Prof. George Papadopoulos – University of Athens, Grecja

Prof. Borys Je. Paton – National Academy of Science, Ukraina

Dr inż. Jan Plewniak – Politechnika Częstochowska, Polska

Dr inż. Anna Pocią – Politechnika Opolska, Polska

Prof. Jacek Senkara – Politechnika Warszawska, Polska

Prof. Andrzej Skorupa – Akademia Górniczo-Hutnicza Kraków, Polska

Prof. Božo Smoljan – University of Rijeka, Chorwacja

Prof. Mirko Sokovic – University of Ljubljana, Słowenia

Prof. Edmund Tasak – Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków, Polska

Prof. Johannes Wilden – University of Applied Sciences, Krefeld, Niemcy

Prof. Hongyan Zhang – University of Toledo, USA

Dyrektor Michał Kozłowski – ESAB Polska, Polska

KOMITET DS. WSPÓŁPRACY Z PRZEMYSŁEM  
/ COMMITTEE OF INDUSTRY COOPERATION

Prezes Marcin Melcer – Messer Eutectic Castolin, Polska

Prezes Mirosław Nowak – Technika Spawalnicza Poznań, Polska

Wiceprezes Adam Ogrodnik – Urząd Dozoru Technicznego, Polska

Dyrektor Zbigniew Pawłowski – Lincoln Electric Bester, Polska

Prezes mgr inż. Andrzej Radziszewski – Resurs, Polska

Dr inż. Krzysztof Sadurski – Lincoln Electric Bester, Polska

Prezes Marek Saperski – BM Biuro Techniki Spawalniczej

Prezes Andrzej Siennicki – CLOOS Polska, Polska

Prezes Jacek Świtkowski – GCE Polska, Polska

Dr inż. Marek Węglowski – Akademia Spawania



ROK ZAŁOŻENIA 1928  
DAWNIEJ

**SPAWANIE  
I CIĘCIE METALI**

Nr 3/2021

PL ISSN 0033-2364

Volumen 93

## SPIS TREŚCI

70 lat Zakładu Inżynierii Spajania Politechniki Warszawskiej ..... 3

30 Lat firmy Technika Spawalnicza Poznań. .... 8

ECLTECH POLSKA – Laserowe oczyszczanie powierzchni. .... 10

Paweł Cegielski, Dariusz Golański, Paweł Kołodziejczak,  
Andrzej Kolasa, Bogusław Silbert, Yevhen Krykavskyy \*  
Selected problems of design and pre-implementation studies  
of new types of manipulators  
**Wybrane problemy projektowania i badań przedwdrożeniowych  
nowych typów maszyn manipulacyjnych** ..... 15

Bernard Wichtowski, Krzysztof Konecki \*  
Fatigue strength of steel plate girder railway bridges  
with butt joints reinforced with one-sided rhomb-shaped cover plates  
**Wytrzymałość zmęczeniowa  
stalowych blachownicowych mostów kolejowych  
ze złączami doczołowymi wzmocnionymi nakładkami** ..... 31

FANUC – roboty stworzone do perfekcyjnego spawania ..... 42

Jakub Ciftci, Ryszard Sitek, Jarosław Mizera \*  
Analysis of direct metal laser sintering – DMLS and heat treatment influence  
on the Inconel 713C nickel alloy structure  
**Wpływ laserowego przetapiania w złożu proszku  
– DMLS i obróbki cieplnej na strukturę stopu niklu Inconel 713C** ..... 49

Arkadiusz Krajewski, Paweł Kołodziejczak,  
Paweł Cegielski, Jarosław Grześ \*  
Support with mechanical vibrations of welding processes  
– review of own research  
**Wspomaganie drganiami mechanicznymi procesów spawalniczych  
– przegląd badań własnych** ..... 57

Jerzy Kozłowski, Jakub Kozłowski  
**Wybrane zagadnienia norm i przepisów  
w zakresie zabezpieczenia antykorozyjnego konstrukcji stalowych  
– wymagania, a rzeczywistość** ..... 75

**Wydarzenia**  
Nominacja profesorska  
Pan prof. dr hab. inż. Tomasz Chmielewski ..... 79

**Informacje wydawcy** ..... 80

\* – artykuł recenzowany





Original Article

## Fatigue strength of steel plate girder railway bridges with butt joints reinforced with one-sided rhomb-shaped cover plates

Wytrzymałość zmęczeniowa stalowych blachownicowych mostów kolejowych ze złączami doczołowymi wzmocnionymi nakładkami

Bernard Wichtowski<sup>1</sup>, Krzysztof Konecki<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie; marek.wichtowski@zut.edu.pl (B.W.)

<sup>2</sup> Saferoad Pomerania Sp. z o.o. w Szczecinie

\* Correspondence: krzysztof.konecki@saferoad.pl ; Tel.: +48-608-630-932 (K.K.)

Received: 02.04.2021; Accepted: 27.05.2021

**Abstract:** Due to the long period of service degradation, bridge structures require periodic technical inspections and assessment of the current load capacity. Since the 1970s, this assessment has been carried out according to the Fitness for Purpose (PUK) criterion. From 2008, the PUK criterion has been replaced with the recommendations of the European Convention on Steel Structures (ECCS). As part of these recommendations, the authors decided to explain the previously obtained unrealistic values of the fatigue class  $\Delta\sigma_c$  of the bridge butt joints, covered with one-sided rhomb-shaped cover plates. The computational analysis performed with the FEM method gave excellent results which are briefly presented in the article.

**Keywords:** steel bridges; welding; welded joints; fatigue

**Streszczenie:** Z uwagi na długi okres eksploatacyjnej degradacji, konstrukcje mostowe wymagają okresowych przeglądów technicznych i oceny aktualnej nośności. Od lat 70 ubiegłego wieku ocenę tę prowadzono według kryterium Przydatności Użytkowej Konstrukcji (Fitness for Purpose). Od roku 2008 kryterium PUK zastąpiono zaleceniami Europejskiej Konwencji Konstrukcji Stalowych (ECCS). W ramach tych zaleceń, autorzy postanowili wyjaśnić wcześniej uzyskane nierealne wartości klasy zmęczeniowej  $\Delta\sigma_c$  mostowych złączy doczołowych, przykrytych jednostronnymi nakładkami rombowymi. Z wykonanej analizy obliczeniowej metodą MES uzyskano rewelacyjne wyniki, które skrótkowo przedstawiono w artykule.

**Słowa kluczowe:** mosty stalowe; spawanie; złącza spawane; zmęczenie

### Wstęp

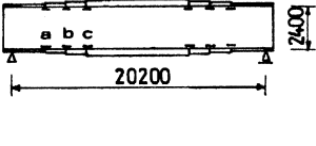
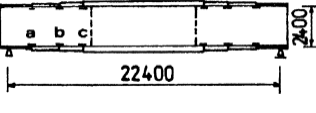
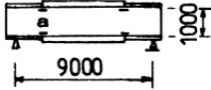
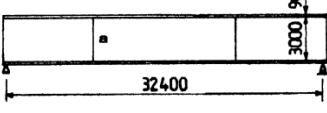
Z prowadzonych przez autora<sup>1</sup> badań diagnostycznych o stanie technicznym eksploatowanych kolejowych obiektów mostowych wynika, że:

- wiele obiektów nie przenosi ściśle obciążeń projektowych, a bezpiecznie przenosi rzeczywiste obciążenia występujące na danej linii [1÷3],
- badania tensometryczne wykazały naprężenia eksploatacyjne znacznie mniejsze od wartości naprężeń obliczonych od obciążeń normowych, stanowiły one od 58 do 64% tych wartości [1,4],
- w przypadku stali, niezależnie od stopnia jej starzenia, każdorazowo uzyskano z badań wartość granicy plastyczności  $R_{eH}$  nie mniejszą niż 220 MPa [5],
- w przebadanych 34 mostach z lat 1936÷1960 wykryto 437 złączy doczołowych z pęknięciami wewnętrznymi spoin (2,8%), których rozwoju nie stwierdzono w badaniach wielokrotnych.

Pierwsi konstruktorzy stalowych mostów zdawali sobie sprawę, że „spoina jest najsłabszym miejscem konstrukcji”. Z uwagi na niezgodności spawalnicze (NS) ich nośność jest mniejsza od nośności materiału spawanego. Najprostszym i najekonomicznym sposobem wyeliminowania tych różnic wydawało się powiększenie przekroju złącza spawanego poprzez dodanie nakładek rekompensujących osłabienie przekroju. Tak postąpiono w sześciu kolejowych spawanych mostach w Polsce, wybudowanych w latach 1937÷1939, tj. do czasu wybuchu II wojny światowej (tabl. I).

**Tablica I.** Schematy dźwigarów i naprężenia w złączach doczołowych z nakładkami (wartości w liczniku) oraz bez nakładek (wartości w mianowniku) i dane badań NDT

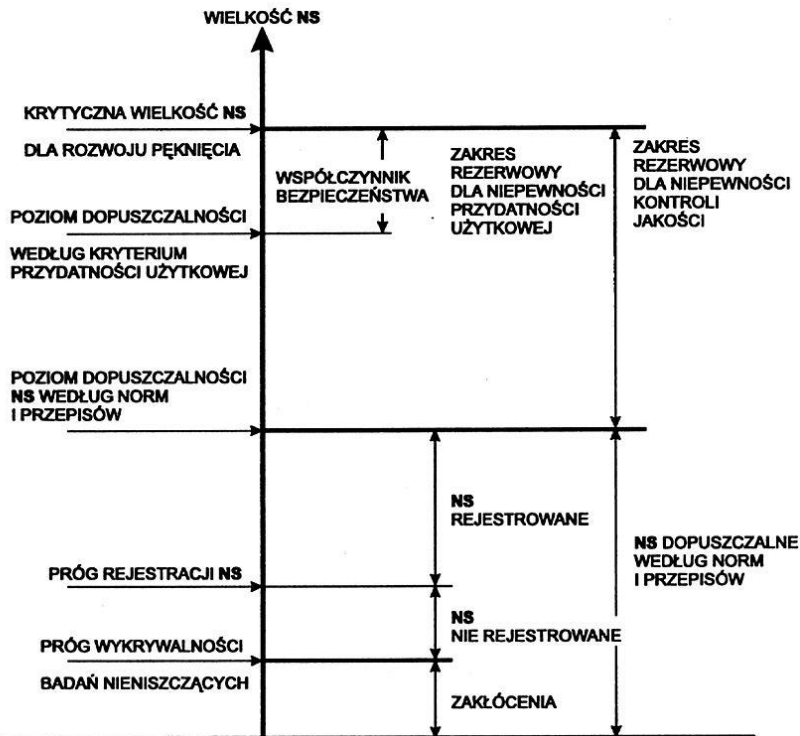
**Table I.** Schemes of girders and stresses in butt joints with one-sided rhomb-shaped cover plates (numerator values) and without the rhomb-shaped cover plates (denominator values) and NDT test data

Linia i rok budowy	Nr mostu	Schemat dźwigara i usytuowanie złącza z pęknięciami	Naprężenia w MPa			Liczba	
			układ obciążeń			Rtg.	Pęknięć
			obc. stałe	P-norm.	P-eksp. <sup>1)</sup>		
1	2	3	4	5	6	7	8
Nasielsk–Toruń 1937, 1938, 1938, 1939	I		$s_a=14,3/16,8$	116,1/136,5	68,4/80,4	88	8
	II		$s_b=15,1/17,1$	122,1/138,1	74,4/84,2	48	6
	III					96	48
	IV		$s_c=15,4/17,0$	123,7/136,6	72,4/79,9	144	39
Łódź–Dębica 1938	V		$s_a=10,3/13,8$	80,8/108,3	47,0/63,1	128	5
	$s_b=12,0/14,3$	93,6/111,1	53,9/63,9				
	$s_c=12,8/14,7$	99,0/113,9	56,8/65,3				
Warszawa–Łowicz 1937	VI		$s_a=5,7/7,3$	96,0/123,2	51,1/65,5	32	–
Poznań–Szczecin 1936	VII		$s_a=24,0$	89,9	62,3 <sup>2)</sup>	80	36
1) lokomotywa ET21 + obciążenie stałe 2) 2 parowozy Pt31 z tendrami 32D29 + obciążenie stałe			Razem			616	142

W tablicy I oszacowano wpływ nakładek rombów na wartości naprężeń charakterystycznych w doczołowych złączach pasowych mostów. W kolumnie 4 zestawiono wartości naprężeń od obciążenia stałego, a w kolumnie 5 – od obciążenia stałego i obciążeń normowych taborem z uwzględnieniem wpływów dynamicznych. Naprężenie normowe wyznaczono dla podstawowego układu obciążeń, przyjmując klasę obciążenia  $k=+2$ . W kolumnie 6 podano wartości naprężeń od obciążenia stałego i ruchomego lokomotywą ET21, a w kol. 7 i 8 dane z badań NDT złączy doczołowych w tych mostach. Dla kontrastu w tablicy zamieszczono również most kolejowy wybudowany przez Niemców w roku 1936. Wykonawca wiedząc, że w naprawionych po awarii dwóch stykach środkowego o  $h=3,0\text{m}$  znajduje się 36 pęknięć, pozostawił obiekt bez wzmocnienia. Czterokrotne badania nie wykazały ich rozwoju. Również obliczenia nie wykazały zagrożenia awaryjnego. Z danych w tablicy wynika, że nakładki rombów zmniejszają naprężenia z kol. 5 o wartości od 12,9 do 27,5 MPa, a naprężenia z kol. 6 o 7,5÷16,1 MPa. Oznacza to zmniejszenie naprężeń od 9,4 do 25,5%.

Zdaniem autorów czas bezpiecznej eksploatacji takich mostów najlepiej szacować z opinii wynikającej z obserwacji zachowania się podobnych konstrukcji. Jednocześnie każdy przypadek wykrytej NS należy poddać syntetycznej analizie, która pozwoli ustalić czy niezgodność jest dopuszczalna z punktu widzenia mechaniki pęknięcia i rzeczywistego stanu obciążenia złącza. Należy wówczas zastosować kryteria Przydatności Użytkowej Konstrukcji (*ang. Fitness for Purpose*) – PUK. Takie podejście, od lat siedemdziesiątych XX wieku, wprowadzono w kilku normach światowych [6,7] – rysunek 1. Autorzy metodykę określaną kryteriami PUK wykorzystali w analizie trwałości mostów przedstawionych w czterech publikacjach.

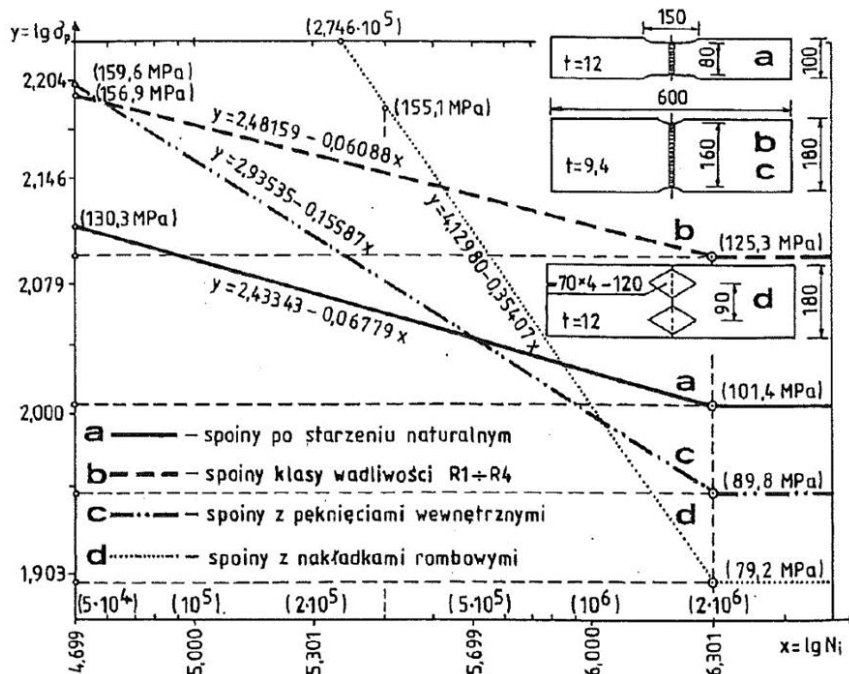
Uwzględniając wyżej podane fakty, w latach 2003-2011, nowe normy z wytycznymi do oceny nośności mostów istniejących zostały zaakceptowane przez Kanadę, Wielką Brytanię, Danię, Szwajcarię i USA. Uwzględniono metodę wykalibrowanych współczynników bezpieczeństwa. Przyjęto obniżone wymagania do nowo projektowanych konstrukcji, jak i wymagań dotyczących ich dalszej eksploatacji. Ocenę nośności mostów starych, długo eksploatowanych omówiono dokładnie m.in. w [2,8,9] oraz w podanych tam łącznie 142 pozycjach literaturowych (62+35+45).



Rys. 1. Poziomy dopuszczalności niezgodności spawalniczych według PUK [6]  
 Fig. 1. Levels of acceptability of welding imperfections according to PUK [6]

### Badania własne

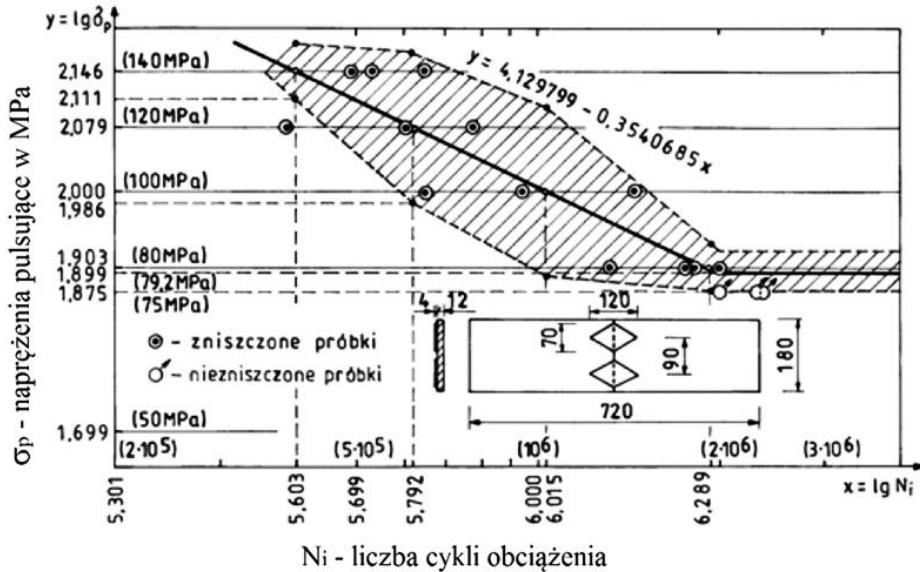
W przypadku spawania na wytrzymałość zmęczeniową mają wpływ różne czynniki, których całościowe uwzględnienie jest możliwe wyłącznie w eksperymentalnych badaniach. Nowe zalecenia dotyczące wytrzymałości zmęczeniowej dla NS poziomu jakości B i C zostały podane w PN-EN ISO 5817:2014 oraz w wytycznych Europejskiego Komitetu JRC i ECCS [10,11], w zakresie oceny trwałości zmęczeniowej mostów. Przeprowadzono badania jakościowe in situ spoin czołowych w 155 mostach eksploatowanych oraz badania laboratoryjne ich złączy doczołowych [1,12]. Objęto nimi cztery grupy mostowych złączy (rys. 2).



Rys. 2. Zestawienie prostych regresji 4 rodzajów złączy ze spoinami czołowymi [1]  
 Fig. 2. Comparison of regression lines of 4 types of tested joints with butt welds [1]

Podane tam proste regresji zmęczeniowej dotyczą badań:

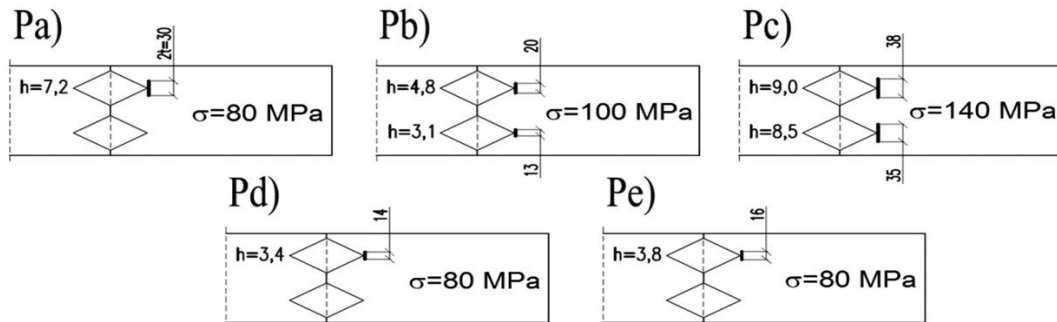
- próbek „a” – ze spoinami czołowymi zestarzonej samorzutnie w okresie 45 lat, dla których wartość nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej (WNWZ) wynosi  $Z_{ij}= 101,4$  MPa,
- próbek „b” – ze spoinami czołowymi poziomu jakości B i C, dla których WNWZ wynosi  $Z_{ij}= 125,3$  MPa,
- próbek „c” – ze spoinami czołowymi z pęknięciami wewnętrznymi (technologicznymi) o WNWZ równej  $Z_{ij}= 89,8$  MPa, próbek „d” – ze spoinami czołowymi przykrytymi jednostronnymi nakładkami rombowymi o WNWZ równej  $Z_{ij}= 79,2$  MPa – rysunek 3.



Rys. 3. Wyniki badań próbek „d” i prosta regresji z obszarem ufności [1]

Fig. 3. Test results for "d" samples and the regression line with the confidence interval [1]

Widoczny jest znaczny spadek wartości  $Z_{ij}$  dla spoin z pęknięciami wewnętrznymi i spoin z nakładkami rombowymi, w porównaniu z wartością  $Z_{ij}$  spoin „b”. Spadek ten wynosi 28,3 i 36,8%. Na uwagę zasługuje fakt, że na trzech poziomach naprężeń  $\sigma_{max}= 80, 100$  i 140 MPa, w pięciu próbkach „d” pojawiło się siedem pęknięć powierzchniowych o parametrach podanych na rysunku 4.





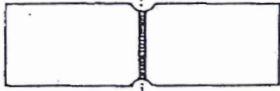
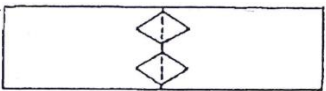
Rys. 4. Próbkki zniszczone: Pa), Pb), Pc) oraz próbkki niezniszczzone: Pd), Pe) [14]

Fig. 4. Test-damaged samples: Pa), Pb), Pc) and test undamaged samples: Pd), Pe) [14]

Zainspirowani wymogiem normy PN-EN-1993-1-9:2007 (zgodnie z pkt. 7.1(3), Uwaga 2) o obowiązku przyrównywania badań indywidualnych z wymogami normowymi, określono nowe kategorie karbu  $\Delta\sigma_c$ . Wykorzystując wyniki badań weryfikacyjnych z rysunku 2, określono je według normy czeskiej ČSN 731401:1998 i zamieszczono w kolumnie 4, tablicy II. Jednocześnie, dla całościowego zobrazowania zagadnienia, w tablicy podano także wartości klas zmęczenia FAT przy innych cyklach obciążenia. Według PN-EN ISO 5817:2014 dla spoin wartość klasy zmęczenia FAT to zakres zmienności naprężeń  $\Delta\sigma_c$  w odniesieniu do 2 – milionowej liczby cykli  $N_c$  ustalonej przy 75% granicy tolerancji ufności średniej z 95% prawdopodobieństwem przetrwania. Uzyskane wartości FAT z tablicy II skomentowano w [12]. Autorzy również obecnie podtrzymują podany tam wniosek o niestosowaniu powyższych zaleceń przeliczeniowych w obiektach eksploatowanych, czyli podobnie jak wytyczne PN-EN 1993-1-10 o niestosowaniu stali ze względu na kruche pęknięcie w konstrukcjach użytkowanych.



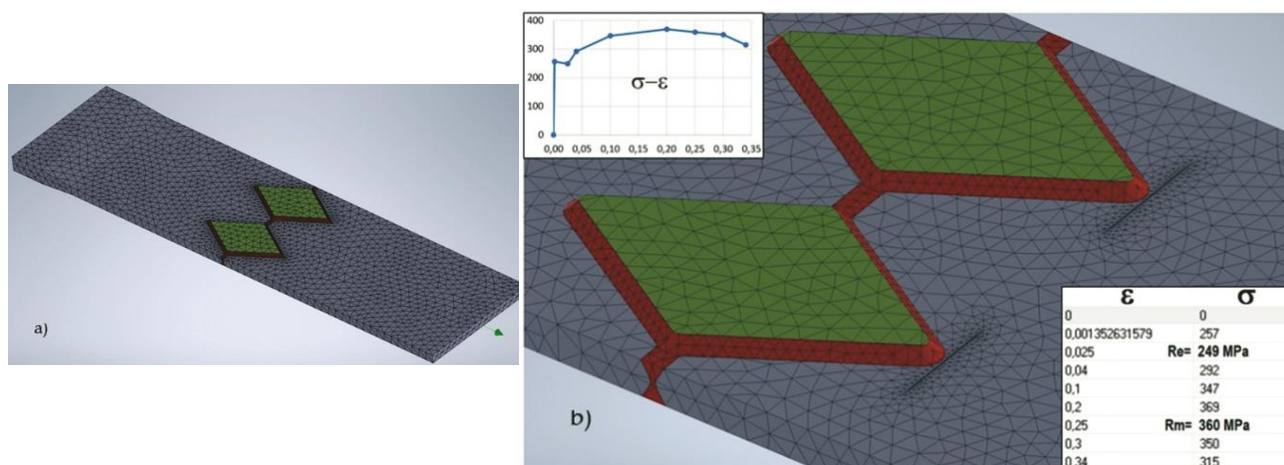
Tablica II. Wytrzymałość zmęczeniowa w MPa dla 4 złączy pasowych  
 Table II. Fatigue strength in MPa for 4 welded flange connections

Szczegół konstrukcyjny	Rodzaj złącza	$Z_{ij}$ ( $N=2 \cdot 10^6$ )	$\Delta\sigma_c$ ( $N=2 \cdot 10^6$ )	$\Delta\sigma_D$ ( $N=5 \cdot 10^6$ )	$\Delta\sigma_L$ ( $N=10^8$ )
	a	101	38	28,0	15,4
	b	125	80	58,9	32,4
	c	90	45	33,1	18,2
	d	79	28	20,6	11,3

Niewytłumaczalnie małe wartości wytrzymałości zmęczeniowej złącza „d”, z jednostronnymi nakładkami rombowymi ( $\Delta\sigma_c = 28$  MPa), zobligowały autorów do przeprowadzenia dokładnej analizy połączenia. Analizę przedstawiono w trzech artykułach opublikowanych w czasopiśmie „Inżynieria i Budownictwo” [13÷15]. Z uwagi na uzyskane „rewolucyjne” wyniki obliczeniowe (casus pascuendus) pragniemy zapoznać z nimi szersze grono zainteresowanych.

### Analiza złącza z nakładkami

Do analizy przyjęto model złącza o geometrii przedstawionej na rysunkach 2 i 3 ze stali o  $R_{eH}=249$  MPa i  $R_m=360$  MPa. Rozkład naprężeń w złączu określono metodą elementów skończonych (MES) w programie Inventor Nastran, na modelu MES pokazanym na rysunku 5. Naprężenia obliczono w przekrojach a-d w punktach 1-1' (rys. 6) przy założonych siłach rozciągających o wartościach przyjętych w badaniach zmęczeniowych wg rysunku 3, czyli  $P=162, 173, 216, 260$  i  $303$  kN. Wywołują one w blasze złącza naprężenia wynoszące 75, 80, 100, 120 i 140 MPa. Ogółem na stronie „A” z nakładkami rombowymi (awers) naprężenia obliczono w 208 punktach a na stronie „R” – rewersu w 180 punktach.



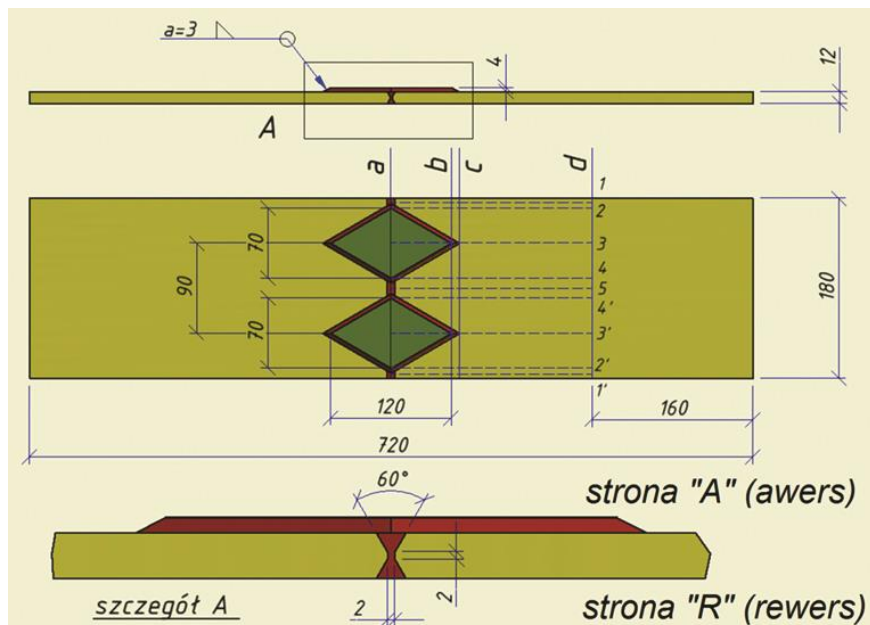
Rys. 5. a) Ogólny model obliczeniowy b) i pęknięcia oraz dane materiałowe stali [13]

Fig. 5. a) General calculation model b) and cracks and material data of steel [13]

Analiza wartości naprężeń rozciągających złącza pozwoliła stwierdzić, że:

- nakładki rombowe nie zmniejszają wartości naprężeń w spoinie czołowej zgodnie z przyjętą zasadą procentowego ilorazu ich powierzchni do powierzchni blachy równego 25,9% (por. tabl. I);
- nakładki to balast konstrukcyjny, zmniejszają WNWZ o około 37% (por. rys. 2);
- nakładki przejmują zwiększenie siły z przekroju c-c na ich końcach, wywołanej koncentracją naprężeń w punktach c3 i (c3');

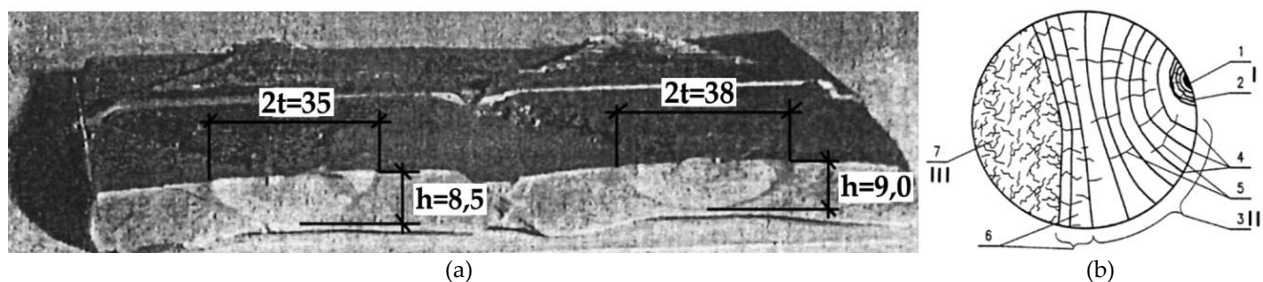
- w okolicy zakończenia nakładek rombowych, w punktach 3 i (3') – przekroju c, występuje koncentracja naprężeń, której współczynnik równy ilorazowi wartości naprężenia na powierzchni „A” do połączenia bez nakładek ( $\sigma_{\max}$ ) wynosi od 1,47 do 1,69;
- powyższa koncentracja naprężeń łącznie z najmniejszym współczynnikiem koncentracji od globalnego (kulistego) wtrącenia niemetalicznego o wartości 2,04 to przyczyny powstawania jednostronnych stochastycznych pęknięć już przy  $\sigma_{\max}=80$  MPa (rys. 4); wówczas  $\sigma=80 \cdot 1,69 \cdot 2,04=275$  MPa, czyli większe od granicy plastyczności stali  $R_{eH}=249$  MPa [16,17].



Rys. 6. Konstrukcja złącza i usytuowanie punktów pomiarowych [13]

Fig. 6. The view of the tested sample and the location of measurement points [13]

Pęknięcia wystąpiły na trzech poziomach naprężeń  $\sigma_{\max}=80, 100$  i  $140$  MPa przy zróżnicowanej liczbie cykli obciążenia od 535.000 do 1.990.200. Są to pęknięcia zmęczeniowe, których rozwój następuje etapowo w przeciwieństwie do pęknięć rozwijających się lawinowo w badaniach złączy: a, b, c wg rysunku 2. Wszystkie pęknięcia miały analogiczny przełom przedstawiony na rysunku 7, o trzech trajektoriach rozwojowych: I – zarodkowanie, II – rozprzestrzenianie szczeliny, III – dołamanie. Rozkład naprężeń na obwodzie tych pęknięć jest każdorazowo analogiczny, o najmniejszych wartościach w strefie górnej, strefie awersu. Są to wartości równe górnym wartościom  $R_{eH}$  stali  $R_{eH}^{\max}=280$  MPa. Natomiast w wierzchołku szczeliny występuje maksymalne naprężenie  $\sigma \approx 306$  MPa (rys. 8).



Rys. 7. a) Złom pęknięć próbki Pc b) i schemat złomu zmęczeniowego: 1,2 – ognisko, 3 – strefa zmęczeniowa, 4 – linie zmęczeniowe 5 – uskoki, 6 – strefa przejściowa, 7 – dołamanie [14,18]

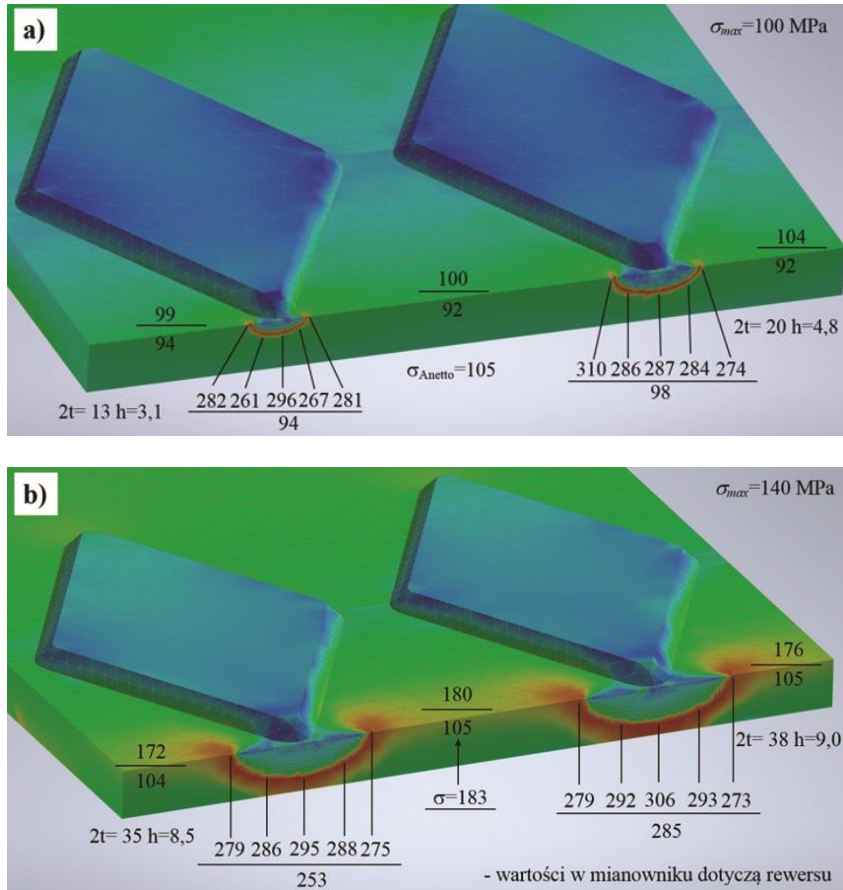
Fig. 7. a) Macro specimen of cracks of Pc sample b) and the scheme of fatigue crack: 1,2 – fatigue origin, 3 – fatigue zone, 4 – fatigue lines, 5 – ratchet marks, 6 – transition zone, 7 – final fracture [14,18]

Według analiz literaturowych dotychczas nie opracowano ścisłego kryterium rozwoju pęknięcia strefy II i III, tj. stref ustalonego rozwoju pęknięcia i strefy niestabilnego rozwoju pęknięcia podczas dołamywania. Nie wykonano tego od 1913 r. (C.E. Inglis) pomimo opracowania na poziomie mikrostruktury 64 hipotez rozwojowych oraz tysięcy publikacji [19÷21]. Przykładowo po rozdziale pt. „rozwój pęknięć zmęczeniowych” w [19] podano 469 uzupełniających pozycji literaturowych. Rozwój pęknięcia jest tam opisywany probabilistycznie w sposób zrozumiały w zasadzie dla specjalistów.



Autorzy artykułu, wykorzystując wyniki obliczonych naprężeń w szczelinach złączy Pb i Pc z rysunku 8, sugerują nowy poniższy rozwój części II pęknięcia. W analizie wykorzystano dwa prawa fizyki:

- przebieg pęknięcia ciągłego może być zahamowany w każdym momencie w wyniku zmniejszenia naprężenia poniżej granicy plastyczności materiału;
- przesuujące się szczyty górnego wymiaru szczeliny o długości  $2t$ , na powierzchni awersu jako pierwsze dotrą do stref naprężeń sprężystych  $s = 99 \div 100$  MPa i  $100 \div 104$  MPa oraz  $172 \div 180$  MPa i  $176 \div 180$  MPa (por. rys. 8). Gwarantuje to geometria szczeliny –  $t/h \approx 2$  i potwierdza analiza złomów, z której wynika, że pęknięcie zwiększa się szybciej wzdłuż awersu niż w głąb materiału.



**Rys. 8.** Naprężenia w przekroju c-c dla : a) pęknięcia Pb, b) pęknięcia Pc [13]

**Fig. 8.** Stresses in the c-c cross-section for: a) Pb crack, b) Pc cracks [13]

Następuje zmniejszenie krawędziowych naprężeń powierzchniowych na awersie do wartości pomierzonych  $273 \div 310$  MPa, czyli do wartości górnej granicy plastyczności materiału ( $Re_{Hmax} = 280$  MPa). Zanika rozwój pęknięcia ciągłego w punktach krawędziowych na poziomie awersu. Zjawisko to ewoluuje na sąsiednie punkty „głębinowe” szczeliny i w ramach zasady wyrównywania naprężeń, sukcesywnie dwustronnie zahamowuje pęknięcie, podążając do wierzchołka pęknięcia. Zanika całkowity rozwój pęknięcia w strefie II.

Generalnie należy stwierdzić, że w dotychczasowych badaniach nie istnieje jeden ogólny model do całościowego opisu pęknięć zmęczeniowych. Wszystkie literaturowo omawiane modele dotyczą wyłącznie I i II stadium ich rozwoju. Jedyne znane autorom modele przejścia ze strefy pęknięcia do dołamania, to III stadium rozwoju pęknięcia opracowane przez A.H. Cottrela i N.J. Petcha, omówione w [20]. Jest to model przejścia od stanu plastycznego do kruchego. Za podstawę tego przejścia przyjęto granicę plastyczności  $\sigma_{pl}$ .

Gdy granica ta jest większa niż naprężenia rozprzestrzeniania się pęknięcia, wówczas materiał jest kruchy i odwrotnie. „Pęknięcie kruche będzie zachodzić, gdy praca przyłożonego naprężenia  $s$  podczas rozprzestrzeniania się pęknięcia będzie dorównywać efektywnej energii nowo powstałej powierzchni”. Oznacza to, że pęknięcie kruche nastąpi przy naprężeniu  $\sigma = \sigma_{pl}$  (por. rys. 8 i tabl. III).

Próbie wyjaśnienia tego zjawiska w odniesieniu do pięciu pęknięć, w zniszczonych trzech złączach Pa, Pb, Pc, przedstawiono w tabelicy III. W analizie tej wykorzystano wyniki podane na rysunku 3, które uzyskano podczas badań wytrzymałości zmęczeniowej przedmiotowych złączy. Praktycznie dotyczy to wartości  $Z_{rij}$  podanej w funkcji  $N_i$ .

**Tablica III.** Analiza strefy dołamywania pęknięć w zniszczonych złączach Pa, Pb, Pc

**Table III.** Analysis of the zone of final fracture cracks in tested samples Pa, Pb, Pc

Nr złącza	$\sigma_{max}$ MPa	Pęknięcie (2t/h) mm	$Z_{rj}^{(1)}$ MPa	$Z_{rjmin}^{(2)}$ (rys. 3) MPa	$\gamma^{(3)}=Z_{rjmin}/Z_{rj}$	$\sigma_{3(3)}$ (rys. 8) MPa	$\gamma \sigma_{3(3)^{(4)}}$ MPa	$\sigma_{pl}$ (rys. 5) MPa	$\gamma \sigma_3=\sigma_{pl}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Pa	80	30/7,2	82,9	79,2	0,955	306	292	280	$\sigma \approx \sigma_{plmax}$
Pb	100	13/3,1 20/4,8	88,7	79,2	0,893	287 (296)	256 (264)	249 ÷280	$\sigma = \sigma_{plmax}$ $\sigma = \sigma_{plmax}$
Pc	140	35/8,5 38/9,0	126,3	79,2	0,627	306 (295)	192 (185)	249	$\sigma < \sigma_{pl}$ $\sigma < \sigma_{pl}$

1) Nieograniczona wytrzymałość zmęczeniowa (NWZ) złącza po pęknięciu, wg równania „y” – rys. 3  
 2) NWZ po  $2 \cdot 10^6$  cyklach obciążenia,  
 3) – współczynnik zmniejszający naprężenia w wyniku wzrostu cykli N,  
 4) Zmniejszone naprężenia przed dołamyaniem, proporcjonalnie do  $\gamma$  - czyli  $\sigma_{3(3)}$  wg rys.8

Określony spadek wartości naprężeń z kol. 7, po zatrzymanym rozwoju pęknięcia, do wartości w chwili załamania wg kol. 8, wyznaczono z prostej regresji określonej na rysunku 3. Wyznaczone tak wartości naprężeń w chwili załamania poszczególnych złączy mają wartości od 185 do 292 MPa (kol. 8). Praktycznie zgodnie z nierównościami podanymi w kol. 10, wartości te według hipotezy A.H. Cottrela i N.J. Petcha decydują o przejściu do pęknięcia kruchej strefy III. Filozofia wyrównywania naprężeń  $\sigma = \sigma_{pl}$  jest tutaj zachowana. Istniejące drobne anomalie w wartościach naprężeń  $\sigma$  dla złączy Pa i Pc wg kol. 8, należy tłumaczyć nieznanymi zróżnicowanymi wartościami współczynników koncentracji naprężeń  $K_\sigma$  wtrąceń niemetalicznych, które zdecydowały o wystąpieniu danego pęknięcia [por.15].

## Podsumowanie

Artykuł jest krótkim streszczeniem, integralną częścią analiz obliczeniowych mostowego pasowego spawanego złącza doczołowego z nakładkami jednostronnymi, przedstawionych w tryptyku opublikowanym w czasopiśmie „Inżynieria i Budownictwo” [13÷15]. Analiza złącza w procesie walidacji przyjętego modelu metodą elementów skończonych pozwoliła w pełni wyjaśnić „celowość” jego stosowania i całościowo określić rozwój pęknięcia zmęczeniowego. Intencją autorów artykułu jest zapoznanie ekspertów prowadzących ocenę stanów technicznych starych mostów, o konstrukcji jak w tytule, z faktem, że ich trwałość obliczeniowa się zmniejszyła. Nakładki na doczołowych złączach pasowych mostów to balast konstrukcyjny, zmniejszają one wytrzymałość zmęczeniową styku i mają bezpośredni wpływ na rozwój pęknięć zmęczeniowych. Marzeniem autorów są dyskusje, konsultacje oraz propozycje grona zainteresowanych nad przedstawionymi zagadnieniami, nierozwiązanymi przez 108 lat. Dla autorów uzyskane wyniki są dużym zaskoczeniem i rewelacją, są szokiem. Dotyczy to w szczególności autora<sup>1</sup>, który u schyłku swego życia dowiedział się, że jest nałogowym kłamcą. Prawda nie jest czynnikiem decydującym, najważniejsza jest akceptacja środowiska zajmującego się daną dziedziną. W tym świetle często uparte odrzucanie nowych rozwiązań nabiera innego wyrazu [12].

Autor<sup>1</sup> przez 50 lat działalności dydaktycznej przekazywał studentom błędną teorię obliczeniową wg tablicy I. Również jako współautor raportów do Ministerstwa Komunikacji, z wieloletnich badań spoin czołowych w krajowych mostach kolejowych, błędnie oceniał ich trwałość. Jak wyjaśnić błędność założeń w wydanych publikacjach przy ocenie trwałości mostów metodą Przydatności Użytkowej Konstrukcji? Błędy te powtórzono w przyjętych referatach na konferencje, przesunięte z uwagi na pandemię koronawirusa, tj. na Eurosteel: 2020 w Sheffield, XIIIC-SAHC 2020 w Barcelonie oraz na ECF23 w Funchal na Maderze.

Przykre jest przyznawanie się do zmiany paradygmatu określającego koncepcje obliczeniowe. Również dlatego, że tutaj wyraz paradygmat ma duże znaczenie ekonomiczne, spowodowane obniżeniem nośności pewnego typu mostów. Przedstawione obliczenia wykazały, że metody deterministyczne umożliwiają lepsze, aniżeli metody probabilistyczne, przewidywane trwałości i niezawodności elementów. W podanych literaturowych 64 wzorach określających prędkości pęknięcia są przede wszystkim opisy o charakterze probabilistycznym, za pomocą których oszacowano zjawiska fizyczne, takie jak zatrzymanie pęknięć na granicach ziaren i innych przeszkodach mikrostrukturalnych. Szersze omówienie tych zagadnień

w kolejowych mostach blachownicowych przedstawiono w referacie na konferencji ECF23 European Conference on Fracture 2020, która miała się odbyć w Portugalii 27.06÷03.07.2020.

Wyniki są pewnym przyczynkiem w toczącej się obecnie dyskusji nad nowymi formami oceny trwałości użytkowej „historycznych” obiektów mostowych. Jest to problem światowy. Eksperti w Polsce ocenę trwałości starych mostów przeprowadzają często bez uwzględniania aktualnych zaleceń i nieraz przy niedokładnej, niekiedy błędnej interpretacji wyników badań. Rodzi się pytanie: dlaczego mają awersję do wprowadzanych nowości? Brytyjczycy już w roku 1972, zgodnie z normą BS 153: Part 3A, wprowadzili podział obiektów kolejowych na cztery grupy w funkcji liczby cykli obciążeń. Jednocześnie w uaktualnionych normach BS 7910:2013+A1:2015 określono wytyczne akceptowalności wad w konstrukcjach metalowych, a w normie BS 7608:2014 podano przepisy do projektowania i oceny zmęczeniowej konstrukcji stalowej. W XXI wieku pięć państw wprowadziło nowe normy dotyczące obciążeń starych mostów. W normie PN-EN ISO 5817:2014 wprowadzono (w załączniku C) enigmatyczne dodatkowe wymagania dotyczące klas zmęczeniowych spoin (FAT) bez wyjaśnień. Brytyjczycy wyjaśnienia zamieścili już wcześniej w komentarzu PD 6705-2:2010 do normy BS EN 1090-2 [22]. Powinniśmy również w załączniku krajowym NA do PN-EN 1090-2 lub PN-EN 1993-2 zamieścić dwie podobne poniższe tablice brytyjskie, tablice IV i V.

**Tablica IV.** Kategorie użytkowe mostów stalowych

**Table IV.** Service categories for steel bridges

Poziom użytkowych obciążeń		Kategoria użytkowa	Statyczny mnożnik użytkowania $k = N_E/N_R$ <sup>A)</sup>		Kategoria zmęczenia $\Delta\sigma_C$ , MPa <sup>B)</sup>
statycznych	zmęczeniowych				
Obniżone	bardzo niskie	F36	rozciąganie $k \leq 0,6$ ściananie $k \leq 0,8$ ściskanie $k \leq 0,8$		$\Delta\sigma_C \leq 36$
Pełne	niskie	F56	– $k \leq 0,8$		$\Delta\sigma_C \leq 56$
Pełne	wysokie	F71	– $k \leq 1,0$		$56 < \Delta\sigma_C \leq 71$
		F90	– $k \leq 1,0$		$71 < \Delta\sigma_C \leq 90$
		F112	– $k \leq 1,0$		$90 < \Delta\sigma_C \leq 112$
		F140	– $k \leq 1,0$		$112 < \Delta\sigma_C \leq 140$

<sup>A)</sup> Współczynnik statycznego wykorzystania  $k$  jest stosunkiem efektu oddziaływania obliczeniowego w stanie granicznym nośności na przekrój poprzeczny elementu lub połączenia podzielonym przez obliczeniową nośność. Gdy nośność jest zależna od interakcyjnego wzoru w przypadku więcej niż jednego rodzaju naprężeń, równomiernie rozdzielona wartość współczynnika  $k$  powinna być zastosowana jako wartość graniczna.

<sup>B)</sup> Minimalna wymagana wartość  $\Delta\sigma_C$  jest najmniejszą wartością, przy której uszkodzenie  $D_L \leq 1$  w przypadku bezpiecznego projektowania na użytkowanie (patrz PN-EN 1993-1-9 i PD 6695-1-9). Kategoria użytkowa zależy od kierunku zmian naprężeń. Warunek nie ma zastosowania do  $\Delta t$ .

**Tablica V.** Przykłady kategorii użytkowej w funkcji konstrukcji elementów mostów

**Table V.** Examples of service category in the function of element and bridge types

Kategoria użytkowa	Zastosowania w obiekcie*		
	kładki dla pieszych	mosty drogowe	mosty kolejowe
F56	większość zwykłych typów	wieże podporowe i słupy, dźwigary główne w przęsłach średniej i dużej rozpiętości, mosty zespolone wielodźwigarowe	dźwigary główne w przęsłach średniej i dużej rozpiętości z ciężkim obciążeniem lub betonową płytą
F71	specjalne przypadki, gdy są wrażliwe na tłum lub drgania wzbudzone wiatrem	poprzecznicę, małe przęsła mostów niezespolonych	dźwigary główne przęsła z korytem balastowym lub pomostem belkowym
F90	—	stalowe pomosty z cienkimi nawierzchniami	dźwigary główne, poprzecznicę i pomosty stalowe w lekkich mostach małych rozpiętości

\* W tablicy określono tylko zalecane wartości, zakładając klasę stali do S355. W przypadku wyższych gatunków kategorie zwiększają się proporcjonalnie do gatunku stali. Aktualną maksymalną kategorię użytkową należy sprawdzić w przypadku każdego określonego projektu.

Reasumując, słusznym wydaje się stwierdzenie prof. Henryka Zobela, przewodniczącego Rady Sektora Budownictwa i Konstrukcji Budowlanych w Polskim Komitecie Normalizacyjnym, że przy aktualnej polityce w zakresie normalizacji: „Polska będzie tylko konsumentem innowacyjności kreowanej w innych państwach europejskich, czyli nie twórcą, lecz odtwórcą”.



**Author Contributions:** Conceptualization B.W. and K.K.; methodology B.W. and K.K.; software K.K.; validation K.K. and B.W.; formal analysis K.K.; investigation B.W. and K.K.; resources B.W.; data curation B.W. and K.K.; writing—original draft preparation B.W.; writing—review and editing K.K.; visualization K.K. and B.W.; supervision B.W.

**Funding:** This research received no external funding

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

## Literatura

- [1] Wichtowski B.: Wytrzymałość zmęczeniowa spawanych złączy doczołowych w stalowych mostach kolejowych. Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej nr 572. Wydawnictwo Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 2002.
- [2] Wiśniewski D.F., Casas J.R., Ghosn M.: Codes for Safety Assessment of Existing Bridges – Current State and Further Development. “Structural Engineering International”, Vol. 22. No. 4/2012.
- [3] Siwowski T.: Trwałość zmęczeniowa drogowych mostów kratownicowych o konstrukcji nitowanej. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 8/2014.
- [4] Wysokowski A.: Trwałość mostów stalowych w funkcji zjawisk zmęczeniowych i korozyjnych. IBDiM, Seria: Studia i Materiały Nr 53, Warszawa 2001.
- [5] Pipinato A. (editor): Innovative Bridge Design Handbook. Construction, Rehabilitation and Maintenance. Elsevier Inc., Amsterdam-Tokyo 2016.
- [6] Klimpel A.: Kontrola i zapewnienie jakości w spawalnictwie, tom 1. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1998.
- [7] Rykaluk K.: Pęknięcia w konstrukcjach stalowych. DWE, Wrocław 1999.
- [8] Wiśniewski D., Majka M., Bień J.: Ocena nośności mostów w okresie ich eksploatacji – doświadczenia krajowe i zagraniczne. „Inżynieria i Budownictwo”, Nr 7-8/2013.
- [9] Al-Emrani M., Aygül: Fatigue Design of Steel and Composite Bridges. “Department of Structural Engineering”. Chalmers University of Technology, Report 2014, Göteborg, Sweden 2014.
- [10] Kühn B. et al: Assessment of existing steel structures: recommendations for estimation of remaining fatigue life. JRC Scientific and Technical Report No. 43401. European Commission, Joint Research Centre, Luxemburg 2008.
- [11] Hobbacher A., Kassner M.: On Relation between Fatigue Properties of Welded Joints, Quality Criteria and Groups in ISO 5817. IIW – document XIII-2323-10.
- [12] Wichtowski B., Wichtowski M.: Analiza wyników badań zmęczeniowych elementów stalowych w świetle wymogów norm europejskich. „Przegląd Spawalnictwa”, nr 5/2018.
- [13] Wichtowski B., Konecki K.: Rozkład naprężeń w złączu stalowym doczołowym z jednostronnymi nakładkami rombowymi określony metodą elementów skończonych. „Inżynieria i Budownictwo”, Nr 12/2020.
- [14] Wichtowski B., Konecki K.: Analiza obliczeniowa metodą elementów skończonych pęknięć zmęczeniowych w złączu stalowym doczołowym z jednostronnymi nakładkami rombowymi. „Inżynieria i Budownictwo”, Nr 3/2021.
- [15] Wichtowski B., Konecki K.: Podsumowanie analizy obliczeniowej złącza stalowego doczołowego z nakładkami rombowymi metodą elementów skończonych. (artykuł w Redakcji „Inżynieria i Budownictwo”).
- [16] Inglis C.E.: Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners. Transactions of the Institute of Naval Architects. Vol. 55, 1913.
- [17] Neuber H.: Theory of notch stresses principles for exact stress calculation. J.W. Edwards, Ann Arbor, Michigan 1946.
- [18] Sachs N.W.: Understanding the Surface Features of Fatigue Fractures: How They Describe the Failure Cause and the Failure History. „Journal of Failure Analysis and Prevention”, vol.5(2), Nr 4/2005.
- [19] Kocarda S.: Zmęczeniowe pękanie metali. WNT, Warszawa 1985.
- [20] Wyrzykowski J.W., Pleszakow E., Sieniawski J.: Odształcanie i pękanie metali. WNT, Warszawa 1999.
- [21] Neimitz A.: Mechanika pękania. WN PWN, Warszawa 1998.
- [22] Published document PD 6705-2:2010 Structural use of steel and aluminum. Part 2: Recommendations for the execution of steel bridges to BS EN 1090-2.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).