



Dr hab. inż. Marian GWÓŹDŹ, prof. PK, margwo@usk.pk.edu.pl

Dr hab. inż. Andrzej MACHOWSKI, prof. PK, a.machowski11@neostrada.pl

mgr inż. Paweł ŻWIREK, pzwi@usk.pk.edu.pl

Politechnika Krakowska

STAN PRZEDAWARYJNY SZKIELETU STALOWEGO SPOWODOWANY WADLIWYMI STYKAMI MONTAŻOWYMI

FORE-DAMAGE STATE OF STEEL FRAME WITH DEFECTIVE FIELD SPLICES

Streszczenie. W trakcie modernizacji szkieletu stalowego budynku przemysłowego wykonano badania kontrolne ultradźwiękowe i magnetyczno-proszkowe niektórych spawanych połączeń montażowych. Oceny jakości badanych połączeń spawanych otrzymane z dwóch niezależnych laboratoriów były negatywne. Podstawowe wymagania jakości nie były spełnione już od 1995 r., kiedy to obiekt został ukończony i rozpoczęto eksploatację. W trakcie zleconych kompleksowych badań eksperckich stwierdzono istnienie ważnych dla bezpieczeństwa budynku odstępstw od projektu wykonawczego. Podczas scalania szkieletu stalowego styki montażowe w ryglach poprzecznych zostały przesunięte do węzłów, w strefę ekstremalnych sił przekrojowych.

Abstract. Some field welded joints ultrasonic and magnetic particle inspection had been made during technological modernization of industrial building steel frame. Welded joints quality assessments obtained from two different laboratories were negative. Fundamental quality requirements weren't fulfilled yet from 1995 year when the object was finished and exploitation was started. During ordered complex investigations some significant for building safety departures from the execution project were constated. In time of the integration of steel frame field spllices in lateral frames girders were displaced to nodes in area of extremal cross-sectional forces.

1. Opis stalowego szkieletu

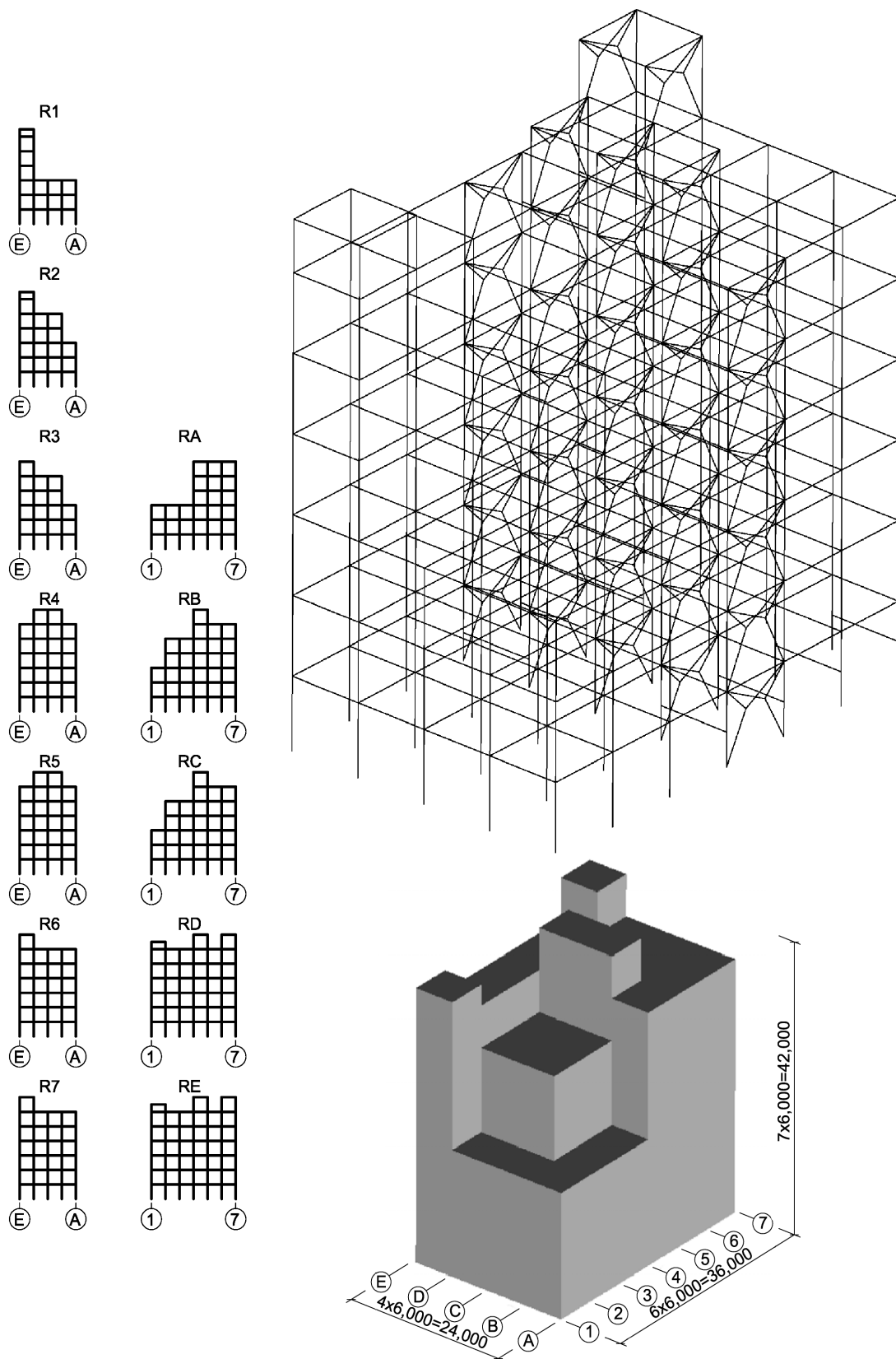
Badany budynek jest obiektem o kubaturze około 30000 m³ oraz wymiarach rzutu poziomego w osiach systemowych 24,00x36,00 m i zróżnicowanej wysokości, która wynosi 18,00 ÷ 42,00 m. Schemat szkieletu i jego podstawowe wymiary oraz przyjęte oznaczenia ram poprzecznych i podłużnych pokazano na rys. 1.

Ramy stalowego szkieletu zostały wykonane z blachownic HKS spawanych na liniach automatycznych i dwuteowników. Zastosowano przekroje ujednocione, a w szczególności:

- stopy i rygle ram poprzecznych (za wyjątkiem rygli górnych) - blachownice HKS 550,
- rygle górne ram poprzecznych - blachownice HKS 360,
- rygle ram podłużnych - dwuteowniki walcowane I 450,
- belki stropowe - dwuteowniki walcowane I 180 – I 300.

Styki montażowe słupów wykonano jako bezpośrednie, na wysokości 1,5 m powyżej poziomu stropu, zgodnie z założeniami projektu. Styki montażowe rygli ram poprzecznych na ogół nie są zgodne z tym projektem. W większości przypadków wbudowano rygle nie

dzielone, które zostały połączone ze słupami spoinami montażowymi, nominalnie czołowymi, jednak z nieudokumentowaną defektoskopowo jakością złączy. Przeprowadzona inwentaryza-



Rys. 1. Schemat i podstawowe wymiary stalowego szkieletu.



Rys. 2. Styk montażowy w ryglu ramy poprzecznej odsunięty od słupa - wykonany zgodnie z projektem.

cja styków montażowych ram poprzecznych wykazała, że tylko cztery styki na ogólną liczbę 314 zostały wykonane zgodnie z projektem, por. rys. 2.

2. Badania defektoskopowe połączeń spawanych

Badania defektoskopowe, w ograniczonym zakresie, zostały wykonane przez dwa niezależne laboratoria specjalistyczne, a w szczególności:

1. Laboratorium Zakładu Spawalnictwa.
2. Laboratorium Metaloznawstwa.

2.1. Badania wykonane przez Laboratorium Zakładu Spawalnictwa

Zrealizowane badania radiograficzne na poziomie 6,00 m, obejmowały węzły rygli ram poprzecznych i słupów 4C, 4D i 6C. Ocena z badań radiograficznych sześciu spoin w złączach teowych blach o grubości 30 mm jest negatywna.

Stwierdzono w tych spoinach następujące niezgodności spawalnicze:

- 402 – brak przetopu
- 2011 – pęcherze gazowe
- 2013 – gniazda pęcherzy
- 2016 – pęcherze kanalikowe

Zrealizowane badania ultradźwiękowe na poziomie 12,00 m, obejmowały węzły rygli ram poprzecznych i słupów 4D i 4E (złącza teowe blach poziomych o grubości 30 mm i pionowe blach o grubości 10 mm). Ocena z badań ultradźwiękowych wszystkich sześciu spoin jest negatywna. Stwierdzono w tych spoinach brak przetopu na 30 % - 95 % długości.

Zrealizowane badania ultradźwiękowe na poziomie 24,00 m, obejmowały węzły rygli ram poprzecznych i słupów 6B i 6C (spoiny poziome blach o grubości 30 mm i pionowe blach o grubości 10 mm). Stwierdzono w badanych spoinach brak przetopu na 40 % - 90 % długości.

2.2. Badania wykonane przez Laboratorium Metaloznawstwa

Powtórzono badania radiograficzne na poziomie 6,00 m w węźle rygla ramy poprzecznej i słupa 4D. Ocena z badań radiograficznych sześciu spoin łączących blachy o grubości 10 mm

i 30 mm jest negatywna (spoiny nie odpowiadają żadnemu poziomowi jakości). Stwierdzono w tych spoinach następujące niezgodności spawalnicze:

402 – brak przetopu

2011 – pęcherze gazowe

2013 – gniazda pęcherzy

Powtórzone badania ultradźwiękowe na poziomie 24,00 m, które obejmowały węzły rygli ram poprzecznych i słupów 6B i 6C (spoiny poziome o grubości 30 mm i pionowe o grubości 10 mm). Ocena z badań ultradźwiękowych wszystkich dziesięciu spoin jest negatywna. Stwierdzono w tych spoinach niezgodności spawalnicze liniowe ϕ 3 mm - ϕ 4 mm na 25 % - 100 % długości w linii wtopu.

Przeprowadzono badania wizualne, w celu wykrycia ewentualnych stanów przed awaryjnych. Badaniami objęto następujące węzły spawane:

- na poziomie 6,00 m: 4B, 4C, 5C, 6C, 5D, 4E, 5E i 6E,

- na poziomie 12,00 m: 3D, 4D, 5D i 3E,

- na poziomie 24,00 m: 6B i 6C.

Zakres badań nie dawał podstaw do oceny, jednak na fragmentach złączy spawanych, które nadawały się do pełnego przeprowadzenia badania nie zaobserwowano pęknięć. Stwierdzono jednak następujące niezgodności spawalnicze:

514 – nierówności lica

602 - rozpryski

604 – ślady szlifowania

605 – ślady dłutowania

2017 – skupiska porów

5011 i 5012 – podtopienia

5093 – wklęsnięcia w licu spoiny

Przeprowadzono badania spoin metodą magnetyczno-proszkową złączy na poziomie 18,00 m, które obejmowały węzły rygli ram poprzecznych i słupów 4B, 5B i 4C i 5C oraz na poziomie + 24,00 m, dla węzłów 5C, 6C, 5D i 6D. Ocena z badań magnetyczno-proszkowych wszystkich ośmiu spoin jest pozytywna.

2.3. Badania uzupełniające

Dyskwalifikacja montażowych spoin czołowych oznacza kolejne (obok zmiany lokalizacji) odstępstwo realizacji od projektu autorskiego. W trakcie budowy, złącza montażowe wykonano spoinami czołowymi o niepełnym przetopie i nie kontrolowanej przez wykonawcę geometrii. Nośność wykonanych spoin, zależy od ich grubości, która jednak nie została na etapie montażu zadeklarowana. Dyskwalifikacja spoin czołowych w złączach montażowych nie jest równoznaczna z dyskwalifikacją styków montażowych rygli ze słupami ram poprzecznych, ponieważ posiadają one nośność wynikającą z nośności spoin czołowo-pachwinowych o niepełnym przetopie lub przynajmniej minimalną nośność spoin pachwinowych. Spoiny czołowe o niepełnym przetopie wymagają jednak spełnienia warunków określonych w p. 6.3.2.1 normy PN-90/B-03200 [1], które należy potwierdzić w specjalistycznych badaniach defektoskopowych. Ze względu na skalę obiektu oraz negatywne wyniki wrywkowych badań defektoskopowych, zrezygnowano z kontroli kryteriów jakości dla spoin czołowo-pachwinowych, poprzestając na wymaganiach jakości dla spoin pachwinowych. Oczywiście oznacza to znaczne zaniżenie nośności obliczeniowej spawanych styków montażowych, jednak kryteria jakości są dla takich spoin łatwiejsze do spełnienia. W szczególności przeprowadzono kontrolę grubości spoin pachwinowych oraz zalecono badania defektoskopowe ewentualnych niezgodności spawalnicze. W ramach uzupełniających badań laboratoryjnych składu chemicznego przeprowadzono rutynową ocenę spawalności stali.

Tablica 1. Zawartość węgla C i równoważnik węglowy Ce stali wbudowanej w obiekt.

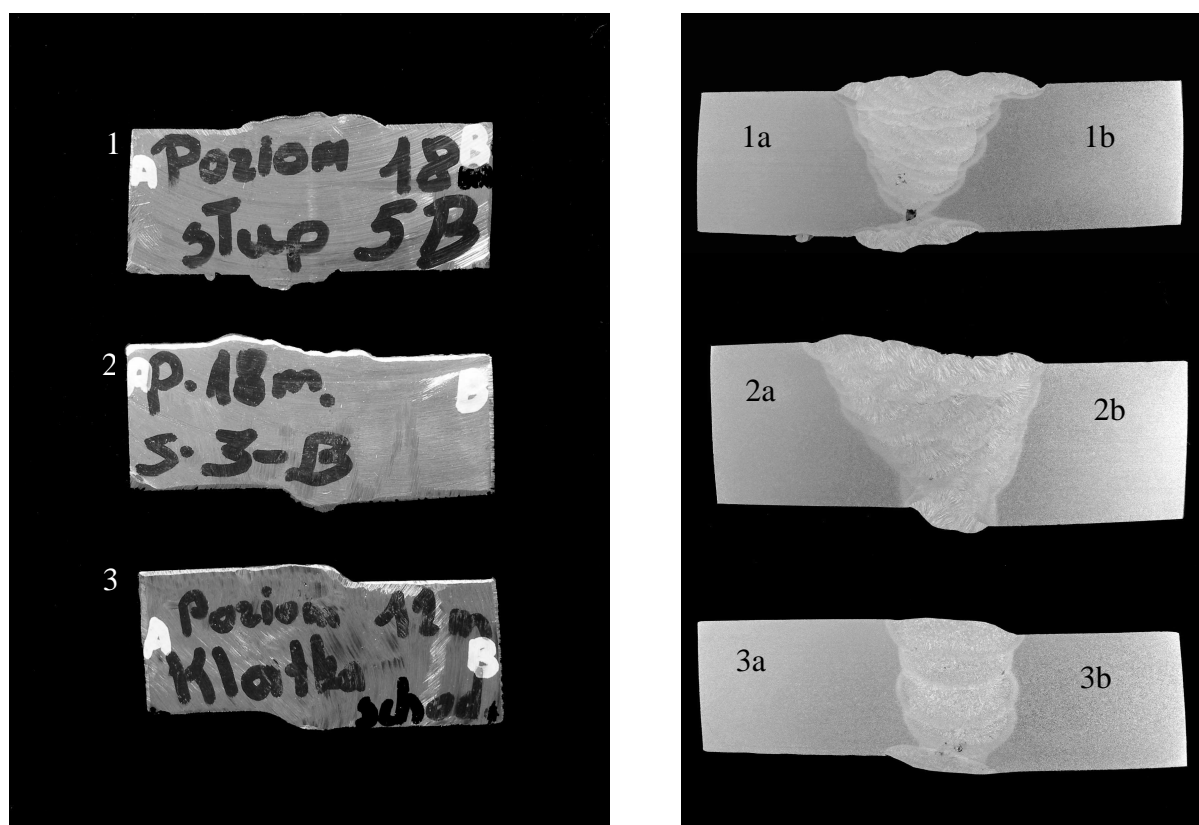
L.p.	1	2	3	4	5	6
C	0,18	0,16	0,16	0,18	0,18	0,17
Ce	0,22	0,25	0,25	0,43	0,28	0,27

Zestawione w tablicy 1 równoważniki węglowe wskazują, że stal z której wykonano szkielet budynku jest spawalna, bez konieczności jej podgrzewania, nawet przy spawaniu blach o grubości 30 mm (wyjątkiem jest próba nr 4 – stal warunkowo spawalna). Maksymalna twardość strefy przejściowej spoin wynika ze składu chemicznego próby 4, dla której wartość twardości w skali Vickersa wynosi:

$$HV = 0,0098 \times (1200 \times 0,43 - 200) = 3,097 \text{ GN/m}^2 < \max HV = 3,43 \text{ GN/m}^2,$$

czyli dla żadnej próby nie ma zagrożenia nadmierną kruchością strefy przejściowej spoin.

Na rys. 3 pokazano zglądy makroskopowe spoin czołowych w stykach montażowych słupów 3B i 5B na poziomie +18,00 m oraz w pasie górnym rygla w styku odsuniętym od słupa 1E na poziomie +12,00 m (por. rys. 2).



Rys. 3. Zglądy makroskopowe spoin czołowych w stykach montażowych.

W badaniach własnych przeprowadzono pomiary grubości spoin czołowo-pachwinowych przy użyciu spoinomierza. Mierzono wysokość trójkąta uformowanego przez część pachwinową spoin w złączach teowych pasów rygli ram poprzecznych z pasami słupów, a otrzymane wyniki pomiarów zestawiono w tablicy 2.

Tablica 2. Pomiary grubości spoin czołowo-pachwinowych

L.p.	Poziom [m]	Węzeł słupa nr	Element rygla	Pozycja spoiny	Grubość [mm]	
1	6,00	D5	Pas górny	podłogowa	14	
2				pułapowa	12	
3			Pas dolny	podłogowa	14	
4				pułapowa	14	
5		B4	Pas górny	podłogowa	12	
6		E4			14	
7		E5			12	
8		E1			10	
9					pułapowa	10
10					Pas dolny	podłogowa
11	pułapowa		10			
12	12,00	Pas górny	podłogowa	20		
13			pułapowa	20		
14		Pas dolny	podłogowa	20		
15			pułapowa	20		
16		B4	Pas górny	podłogowa	14	
17		C4			14	
18	B5	12				
19	12,00	C5	Pas górny	podłogowa	12	
20		D5			12	
21		E1			10	
22					B4	12
23	C4				12	
24					14	
25					12	
26					B5	10
27	C5	10				
28	18,00	E1	pułapowa	12		
29				10		
30		Pas dolny	pułapowa	10		
31				10		
32	24,00	C5	Pas górny	podłogowa	14	
33					C6	8
34					B6	8
35						12
36		E1		14		
37				pułapowa	12	
38				Pas dolny	podłogowa	12
39					pułapowa	10
40	Środnik	naścienna	5			
41	30,00	E1	Pas górny	podłogowa	12	
42				pułapowa	12	
43		Pas dolny	podłogowa	10		
44			pułapowa	8		
45		Środnik	naścienna	5		
46	36,00	E1	Pas górny	podłogowa	14	
47				pułapowa	14	
48		Pas dolny	podłogowa	12		
49			pułapowa	12		
50		Środnik	naścienna	6		

3. Analiza nośności stalowego szkieletu

Nośnością porównawczą styków montażowych rygli ram poprzecznych ze słupami jest nośność na zginanie i na ścinanie przekroju rygla HKS 550-5, wykonanego ze stali S 235:

$$M_R = 205 \times 1,05 \times 8540 \times 10^{-3} = 1838 \text{ kNm},$$

$$V_R = 0,58 \times 1,2 \times 49,0 \times 215 \times 10^{-1} = 733 \text{ kN}.$$

Nośność przekroju zginanych spoin montażowych czołowych, bez kontroli defektoskopowej:

$$M_{Rst} = 0,9 \times 0,85 \times 205 \times 8540 \times 10^{-3} = 1340 \text{ kNm},$$

stanowi 73% nośności przekroju blachownicy.

Nośność przekroju czołowych spoin pionowych na ścinanie

$$V_{Rs} = 0,9 \times 0,58 \times 1,2 \times 49,0 \times 215 \times 10^{-1} = 660 \text{ kN},$$

stanowi 90 % nośności przekroju blachownicy.

Nośność na zginanie układu spoin przekwalifikowanych na spoiny pachwinowe o grubości 8 mm (spoiny poziome) i 5 mm (spoiny pionowe)

$$\min M_{Rs} = 0,9 \times 0,9 \times 4501 \times 205 \times 10^{-3} = 747 \text{ kNm}$$

co stanowi 41 % nośności przekroju blachownicy HKS 550-5.

Nośność spoin pionowych na ścinanie

$$V_{Rs} = 49,0 \times 0,9 \times 0,8 \times 215 \times 10^{-1} = 759 \text{ kN}$$

co stanowi 104 % nośności na ścinanie przekroju blachownicy HKS 550-5.

Przeprowadzono obliczenia statyczne wg uproszczonej teorii 2 rzędu z uwzględnieniem obciążeń stałych g i zmiennych p , s , w oraz imperfekcji szkieletu w postaci przechyłu wstępnego. Wykorzystano do obliczeń program komputerowy Robot Millenium, uwzględniając następujące schematy statyczne:

- schemat (A) układ ramowy ze wszystkimi węzłami sztywnymi zarówno w kierunku poprzecznym jak i podłużnym,

- schemat (B) układ ramowy mieszany dla ram poprzecznych - z węzłami przegubowymi i węzłami sztywnymi, o konfiguracji koniecznej dla zachowania stateczności układu prętowego oraz dla ram podłużnych ze wszystkimi węzłami sztywnymi,

Schemat (B) ma znaczenie pomocnicze w prognozie nośności stalowego szkieletu i modeluje ustrój z wadliwymi złączami spawanymi, czyli dopuszcza ewentualne pęknięcia spoin w większości styków montażowych rygli ze słupami ram poprzecznych.

W tabelicy 3 zamieszczono wyciąg z obliczeń statycznych dla schematu (A). Czcionką wytłuszczoną zaznaczono siły wewnętrzne, które są większe niż obliczeniowe nośności przekrojów prętów w stanach prostych. Warunek nośności spoin montażowych rygli ram poprzecznych, wyprowadzony ze wzoru (92) z normy PN-90/B-03200 ma postać:

$$\sqrt{\left(\frac{M}{M_{Rs}}\right)^2 + \left(\frac{V}{V_{Rs}}\right)^2} \leq 1 \quad (1)$$

lub po przekształceniu:

$$M_{eq} = \sqrt{M^2 + (Vr_v)^2} \leq M_{Rs}, \quad r_v = M_{Rs}/V_{Rs}. \quad (2)$$

Można łatwo wykazać, że warunek (2) nie jest spełniony dla styków montażowych w przekrojach przywęzłowych prętów ram poprzecznych wykazanych w tabelicy 3 w poz. 1, 3 i 4. Analogicznie można wykazać, że przekroczone są warunki nośności spoin w stykach montażowych w przekrojach przywęzłowych rygli ram podłużnych w poz. 5÷16.

4. Podsumowanie

Wprowadzona w roku 1995, w trakcie budowy szkieletu, zmiana usytuowania styków montażowych rygli ze słupami ram poprzecznych była niekorzystna, ponieważ w węzłach ram

Tablica 3. Siły przekrojowe w spawanych stykach montażowych

L.p.	Rama	Poziom [m]	Nawa	M [kNm]	V [kN]
Ramy poprzeczne					
1	R4	12,00	A-B	581,5	887,0
2	R4	18,00	C-D	560,9	576,2
3	R5	12,00	A-B	650,4	831,8
4	R6	24,00	C-D	598,0	616,2
Ramy podłużne					
5	RB	6,00	1-2	311,0	243
6	RB	6,00	2-3	286,7	211,0
7	RB	12,00	1-2	297,8	263,8
8	RB	24,00	6-7	493,1	533,3
9	RC	6,00	1-2	305,3	239,8
10	RC	12,00	4-5	289,9	253,7
11	RC	18,00	4-5	512,8	488,5
12	RD	6,00	1-2	317,9	246,7
13	RD	6,00	2-3	332,4	243,9
14	RD	24,00	5-6	411,7	366,7
15	RE	6,00	2-3	287,1	210,6
16	RE	12,00	2-3	283,9	207,7

poprzecznych występują ekstremalne momenty zginające i siły poprzeczne. Ponadto bez kompleksowych badań defektoskopowych jakości wykonywanych spoin montażowych oznaczało to degradację obliczeniowej nośności spoin rozciąganych o $100(1-0,85 \times 0,9) = 24\%$. W związku z planowaną modernizacją technologiczną budynku oraz wynikającą z tej modernizacji zmianą obciążeń, wykonano badania defektoskopowe niektórych styków montażowych rygli ram poprzecznych ze słupami. We wszystkich badanych złączach ocena jakości spoin czołowych wypadła negatywnie. Wykazane przez dwa niezależne laboratoria badań defektoskopowych niezgodności spawalnicze dyskwalifikują spoiny czołowe w stykach montażowych. Dyskwalifikacja tych spoin nie jest równoznaczna z dyskwalifikacją styków montażowych. Posiadają one nośność wynikającą z nośności spoin o niepełnym przetopie, którą można dość łatwo oszacować w pomiarach grubości wykonanych spoin. W zaleceniach doraźnych zaprojektowano odpowiednie wzmocnienia przeciążonych węzłów ram poprzecznych i podłużnych, wzmocnienia przeciążonych środników niektórych rygli oraz wymianę wszystkich stężeń pionowych.

Powstaje jednak pytanie o warunki odbioru w procesie inwestycyjnym i warunki dopuszczenia analizowanego obiektu do eksploatacji. Wady spoin wykryto przypadkowo, a obiekt był eksploatowany z pełnym przekonaniem inwestora, że konstrukcja nośna jest bezpieczna. Nie może uspakając konkluzja, że był to okres przejściowy, w którym dopiero wchodziło w życie znowelizowane *Prawo budowlane* [2] oraz że był to początek głębokich zmian w procesach realizacji inwestycji budowlanych. Nie ma pewności, że opisany przypadek miał charakter incydentalny, dlatego wydaje się celowa weryfikacja warunków eksploatacji dużych obiektów kubaturowych zrealizowanych w latach 1990-tych.

Literatura

1. PN-90/B-03200. Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie.
2. Prawo budowlane. Ustawa z dnia 7 lipca 1994, Dziennik Ustaw nr 89.