

dr hab. inż. Eugeniusz Hotała, prof. PWR¹⁾*)

ORCID: 0000-0003-2286-8436

dr inż. Jan Gierczak¹⁾

ORCID: 0000-0003-3219-1844

dr inż. Rajmund Ignatowicz¹⁾

ORCID: 0000-0003-3663-0170

dr inż. Krzysztof Marcinczak¹⁾

ORCID: 0000-0002-8789-5243

Fatigue durability testing of a transport gallery in a power plant

Badania trwałości zmęczeniowej galerii transportowej w elektrowni

DOI: 10.15199/33.2026.09.03

Abstract. Fatigue strength analyses of the steel structure of a single span of a coal transport gallery in one of the power plants were presented. The analyses were performed on the basis of the results of periodic monitoring of gallery vibrations during different conveyor belt capacities and on the basis of the results of strain gauge measurements of stresses in the main lattice structure of the gallery span. The values of the measured stresses in various operating conditions of the gallery varied greatly, but did not exceed the permanent fatigue strength of the main load-bearing structure of the gallery. The conclusions from the analyses may be useful in assessing the fatigue strength of other transport galleries where resonance vibrations of lattice load-bearing structures occur.

Keywords: steel structures; structural vibrations; fatigue strength; stress measurements

Streszczenie. W artykule przedstawiono analizy wytrzymałości zmęczeniowej stalowej konstrukcji jednego przęsła galerii transportowej węgla w jednej z elektrowni. Analizy wykonano na podstawie wyników okresowego monitorowania drgań galerii podczas różnej wydajności taśmociągów oraz na podstawie wyników tensometrycznych pomiarów naprężeń w głównej kratowej konstrukcji przęsła galerii. Wartości amplitud pomierzonych naprężeń, w różnych stanach eksploatacyjnych galerii, były bardzo zróżnicowane, ale nie prowadziły do przekroczenia trwałej wytrzymałości zmęczeniowej głównej konstrukcji nośnej galerii. Wnioski z analiz mogą być przydatne w ocenie nośności zmęczeniowej innych galerii transportowych, w których dochodzi do drgań rezonansowych kratowych konstrukcji nośnych.

Słowa kluczowe. konstrukcje stalowe; drgania konstrukcji; wytrzymałość zmęczeniowa; pomiary naprężeń

Steel gallery structures housing belt conveyors for coal transport constitute fundamental critical infrastructure facilities in coal-fired power plants. Typically, these are multi-span load-bearing structures consisting of spatial trusses, where each span features two vertical trusses (Figure 1a) and two horizontal trusses located in the roof and floor planes (Figure 1b).

The reliability of coal conveyor galleries is crucial for power plant operation. Existing literature outlines emergency hazard scenarios for transport galleries resulting from natural wear and tear, operational neglect [1], dust explosions [2], or fires. Generally, little attention is paid to the effects of cyclic actions originating from conveyor operation. As a consequence of the unavoidable forced vibrations of the gallery, cyclic stresses arise within its supporting structure, which can lead to fatigue failure of its structural elements.

The number of fatigue load cycles N_0 depends on the operating period and the frequency of vibrations induced by the conveyors. In the analyzed gallery case, the number of load cycles N_0 slightly exceeded 10^8 over 10 years of operation, causing the fatigue strength of the structural notches in the gallery to reach its endurance limit – the lowest possible value. If the operating conditions remained unchanged and there were no signs of fatigue failure (fatigue cracking), further ope-

stalowe konstrukcje galerii, w których zainstalowane są przenośniki taśmowe do transportu węgla, należą do podstawowych obiektów infrastruktury krytycznej elektrowni węglowych. Zazwyczaj są to wieloprzęsłowe ustroje nośne, złożone z kratownic przestrzennych, w których w każdym z przęseł występują dwie kratownice pionowe (rysunek 1a) oraz dwie kratownice poziome w płaszczyźnie dachu i w płaszczyźnie podłogi (rysunek 1b). Niezawodność galerii transportowych węgla ma kluczowy wpływ na funkcjonowanie elektrowni. W literaturze przedstawiane są przypadki zagrożeń awaryjnych galerii transportowych wskutek naturalnego zużycia lub zaniedbań eksploatacyjnych [1], a także wskutek wybuchów pyłów [2] lub pożaru. Na ogół nie zwraca się uwagi na skutki oddziaływań cyklicznych wynikających z eksploatacji taśmociągów. W efekcie nieuniknionych wymuszonych drgań galerii występują w jej konstrukcji nośnej cykliczne naprężenia, które mogą prowadzić do wyczerpania nośności zmęczeniowej elementów tej konstrukcji.

Liczba cykli obciążeń zmęczeniowych N_0 zależy od okresu eksploatacji i częstotliwości drgań wymuszonych przez przenośniki. W przypadku analizowanej galerii liczba cykli obciążeń N_0 w ciągu dziesięciu lat eksploatacji przekroczyła nieco wartość 10^8 . W efekcie wytrzymałość zmęczeniowa karbów konstrukcyjnych w galerii osiągnęła wartość trwałą, a więc najniższą z możliwych. W przypadku, gdy warunki eksploatacji nie uległyby zmianie i nie byłoby objawów wyczerpania nośności zmęczeniowej (pęknięć zmęczeniowych), to dalsza eksploatacja galerii, ze względu na nośność zmęczeniową, byłaby

¹⁾ Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

^{*)} Address for correspondence: eugeniusz.hotala@pwr.edu.pl

ration of the gallery would be safe with respect to fatigue capacity. However, after 10 years of operation, the gallery structure was retrofitted (Figure 3) due to insufficient load-bearing capacity. Following the retrofit, its natural vibration frequency changed unfavourably, resulting in a resonance condition that increased the stress range amplitude in the lattice supporting structure compared to the pre-retrofitted state.

The presented fatigue strength analyses of a single span of the gallery structure were based on long-term, direct strain gauge measurements of normal stress ranges $\Delta\sigma_N$ during various operational states. The natural vibration frequencies of the gallery span before and after retrofitting were measured, alongside the actual parameters of forced vibrations during the operation of conveyors P1 and P2 (Figure 2). The results of these analyses enabled the gallery to be cleared for continued operation, despite the highly unfavourable dynamic characteristics of the retrofitted span structure. The conclusions drawn from these analyses can be applied to evaluate the fatigue life of other transport galleries, as they are based on measured stress amplitude values in a real-world structure. Such measurements are unique and therefore hold significant practical value.

General characteristics of the gallery structure

The multi-span, lattice coal conveyor gallery at a power plant is equipped with two belt conveyors, P1 and P2 (Figure 2), with a capacity of 6,500 Mg/h, which have been operated alternately for over 10 years. The span lengths of the gallery range from 30 to 54 m. The structural scheme of both vertical load-bearing trusses of the end span is shown in Figure 1a, and the trusses in the roof and floor planes are presented in Figure 1b.

The roof and vertical wall cladding was executed using sandwich panels with a mineral wool core, while the floor consists of a monolithic reinforced concrete slab. Certain gallery spans, including the end span, were retrofitted after ten (10) years of operation (Figure 3) due to the necessity of increasing the insufficient load-bearing capacity and stiffness of its steel structure. Retrofitting the main lattice structure of the gallery resulted in an increase in its stiffness and, consequently, its natural vibration frequencies, as confirmed by direct measurements. In the

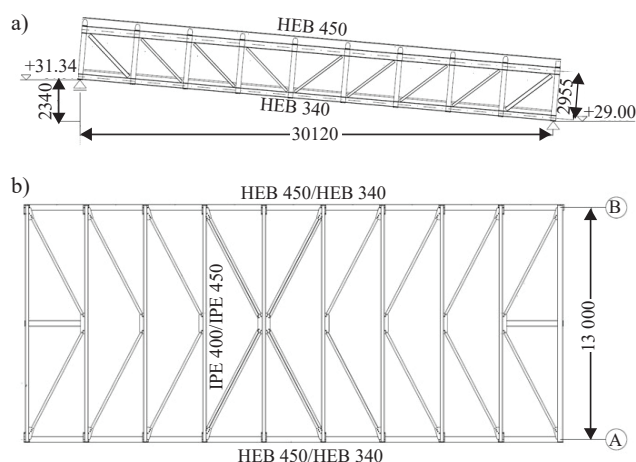


Fig. 1. Diagram of the structure of the tested transport gallery span: a) geometry of vertical trusses in axes A and B, b) geometry of roof and floor trusses

Rys. 1. Schemat konstrukcji badanego przęsla galerii transportowej: a) geometria kratownic pionowych w osiach A i B; b) geometria kratownic dachu i podłogi

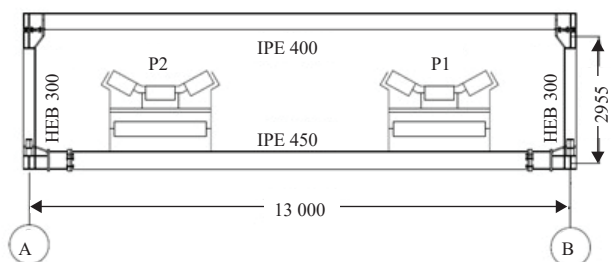


Fig. 2. Cross-section diagram of the gallery

Rys. 2. Schemat przekroju poprzecznego galerii

bardzo niekorzystnej charakterystyki dynamicznej konstrukcji wzmocnionego przęsla. Wnioski z analiz mogą być wykorzystane w ocenie trwałości zmęczeniowej innych galerii transportowych, gdyż bazują na pomierzonych wartościach amplitud naprężeń w realnej konstrukcji. Takie pomiary są unikatowe, dlatego też mają dużą wartość praktyczną.

Ogólna charakterystyka konstrukcji galerii

Wieloprzęslowa, kratownicowa galeria do transportu węgla w jednej z elektrowni wyposażona jest w dwa przenośniki taśmowe P1 i P2 (rysunek 2) o wydajności 6500 Mg/h, eksploatowane zamiennie przez ponad 10 lat. Rozpiętość przęsel galerii wynosi 30–54 m. Schemat statyczny obu pionowych kratownic nośnych skrajnego przęsla pokazano na rysunku 1a, a kratownic w płaszczyźnie dachu i podłogi – na rysunku 1b.

Obudowa dachu i ścian pionowych została wykonana z płyt warstwowych z rdzeniem z wełny mineralnej, a podłoga jest monolityczną płytą żelbetową. Niektóre przęsla galerii, w tym przęsło skrajne, wzmocniono po dziesięciu latach eksploatacji (rysunek 3) ze względu na konieczność zwiększenia zbyt małej nośności i sztywności jej stalowej konstrukcji. Wzmocnienie głównej kratowej konstrukcji galerii spowodowało zwiększenie jest sztywności, a więc również częstotliwości drgań własnych, co potwierdziły bezpośrednie pomiary. W przęśle skrajnym (rysunek 1) częstotliwość drgań własnych była prawie taka sama

bezpieczna. Konstrukcja galerii po dziesięciu latach eksploatacji została wzmocniona (rysunek 3), ponieważ stwierdzono zbyt małą nośność. Po wzmocnieniu zmieniła się niekorzystnie jej częstotliwość drgań własnych i wystąpiła sytuacja rezonansu, skutkującego zwiększoną amplitudą zmiany naprężeń w kratowej konstrukcji nośnej galerii w stosunku do stanu przed wzmocnieniem.

Zaprezentowane analizy wytrzymałości zmęczeniowej jednego przęsla konstrukcji galerii wykonano na podstawie wielogodzinnych bezpośrednich pomiarów tensometrycznych zmiany naprężeń normalnych $\Delta\sigma_N$ podczas jej różnych stanów eksploatacyjnych. Mierzono też częstotliwość drgań własnych przęsla galerii przed i po wzmocnieniu, a także realne parametry drgań wymuszonych podczas eksploatacji przenośników P1, P2 (rysunek 2). Wyniki analiz pozwoliły na dopuszczenie galerii do dalszej eksploatacji, pomimo

end span (Figure 1), the natural vibration frequency was almost identical to the frequency of vibrations induced by the conveyor idlers. Given the risk of resonance vibrations in this span and the potential occurrence of high stress range amplitudes of cyclically varying normal stresses σ_N within the structure of the vertical load-bearing trusses (Figure 1a), strain gauge measurements of changes in the stress state were conducted on selected members. On this basis, fatigue analyses were performed in accordance with standard [3], and the fatigue life of the gallery span was evaluated for the anticipated further twenty-year operating period.

The strain gauge measurements applied solely to the end span with a horizontal support clearance of 30.120 m (Figures 1a and 3), as this span was exposed to resonance vibrations.

The forced vibrations of the presented gallery span arise primarily from the rotation of the conveyor belt idlers driven by the moving belt. The belt speed was 4 m/s, and the diameter of a single idler was 186 mm, resulting in an idler rotational frequency of 6.85 Hz. Dynamic measurements and calculations revealed that the natural vibration frequency of the tested span was 5.6 Hz prior to retrofitting, and increased to 6.8 Hz following the retrofitting (Figure 3) – matching the frequency of the forced vibrations.

In the remaining gallery spans, the natural vibration frequencies of their lattice structures ranged from 2 to 4.5 Hz; thus, they posed no risk of resonance vibrations once the steady belt speed of 4 m/s was reached.

Vibration measurements of the gallery span structure

During conveyor operation, noticeable transient significant vibrations of the transport gallery structure occurred across various spans, particularly in the span with the shortest length, shown in Figure 1. These vibrations became distinctly perceptible after the structure was retrofitted (Figure 3). Consequently, monitoring of these vibrations was initiated using specialized equipment to capture kinematic excitation vibrograms, which enabled recording the RMS acceleration amplitude spectrum and RMS vibration amplitudes in three directions (x, y, z), as well as measuring the natural vibration frequencies of the gallery spans. The z-direction corresponds to the vertical axis, perpendicular to the longitudinal axis of the gallery. This direction of vibration was particularly significant for evaluating the stress state of the vertical trusses in the tested gallery span (Figures 1a and 3).

Vibration measurements were carried out in eight sessions at monthly intervals during the operation of one of the conveyors at varying throughput capacities Q , as well as with an empty belt ($Q = 0$). In the tested span, four measurements of the vertical truss vibration parameters were recorded every two minutes at the mid-span.

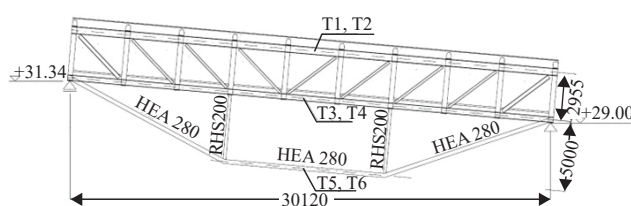


Fig. 3. Diagram of the gallery span after reinforcement and location of strain gauges T1 – T6

Rys. 3. Schemat przęsła galerii po wzmocnieniu oraz lokalizacja tensometrów T1 – T6

jak częstotliwość drgań wymuszonych przez krążniki przenośników. Ze względu na ryzyko drgań rezonansowych tego przęsła i możliwość wystąpienia dużych amplitud cyklicznie zmieniających naprężeń normalnych σ_N w konstrukcji pionowych kratownic nośnych (rysunek 1a), przeprowadzono pomiary tensometryczne zmiany stanu naprężeń w wybranych prętach.

Na tej podstawie wykonano analizy zmęczeniowe wg normy [3] i oceniono trwałość zmęczeniową przęsła galerii w przewidywanym okresie dwudziestu lat dalszej eksploatacji. Pomiary tensometryczne dotyczyły tylko przęsła skrajnego o rozpiętości podpór w rzucie poziomym 30,120 m (rysunki 1a i 3), gdyż przęsło to narażone było na drgania rezonansowe.

Drgania wymuszone prezentowanego przęsła galerii wynikają przede wszystkim z obrotu krążników taśmy przenośnika pod wpływem przesuwu taśmy. Prędkość taśmy wynosiła 4 m/s, średnica pojedynczego krążnika 186 mm, a częstotliwość obrotów pojedynczego krążnika 6,85 Hz. Pomiary i obliczenia dynamiczne wykazały, że częstość drgań własnych badanego przęsła miała przed wzmocnieniem wartość 5,6 Hz, a po wzmocnieniu (rysunek 3) zwiększyła się do 6,8 Hz, a więc do takiej samej wartości jak częstotliwość drgań wymuszonych. W pozostałych przęsłach galerii częstotliwość drgań własnych ich kratownicowych konstrukcji wynosiła 2 – 4,5 Hz, a więc nie występowało w nich ryzyko drgań rezonansowych po uzyskaniu stałej prędkości taśmy 4 m/s.

Pomiary drgań konstrukcji przęsła galerii

Podczas eksploatacji przenośników pojawiały się chwilowe znaczne drgania konstrukcji różnych przęsł galerii transportowej, szczególnie w przęsle o najmniejszej rozpiętości, pokazanym na rysunku 1. Drgania te były wyraźnie odczuwalne po wzmocnieniu konstrukcji (rysunek 3). Rozpoczęto więc monitorowanie tych drgań za pomocą specjalistycznego sprzętu w postaci wibrogramu wymuszeń kinematycznych, który pozwalał zarejestrować widmo amplitudowe przyspieszenia RMS i amplitud drgań RMS w trzech kierunkach x, y, z, a także pomierzyć częstotliwość drgań własnych przęsł galerii. Kierunek „z” jest kierunkiem pionowym, prostopadłym do podłużnej osi galerii. Ten kierunek drgań był szczególnie istotny w przypadku oceny wyłączenia pionowych kratownic badanego przęsła galerii (rysunki 1a i 3).

Wykonano pomiary drgań w ośmiu sesjach, w miesięcznych odstępach, podczas eksploatacji jednego z przenośników z różną wydajnością Q oraz z pustą taśmą ($Q = 0$). W badanym przęsle wykonywano po 4 pomiary parametrów drgań kratownic pionowych co 2 min w środku rozpiętości przęsła.

W tabeli przedstawiono wyniki pomiarów w postaci średniego przyspieszenia drgań pionowych a_z i amplitud drgań pionowych u_z . Podczas trzech sesji pomiarowych zarejestrowano jednorazowe duże wartości a_z , znacznie odbiegające od pozostałych. Potraktowano je jako wyjątkowe i zapisano od-

The table presents the measurement results expressed as the mean vertical vibration acceleration a_z and vertical vibration amplitudes u_z . During three measurement sessions, single large values of a_z were recorded that deviated significantly from the rest. These were treated as outliers and recorded separately in the table, excluded from the mean values. These exceptional transient acceleration values raised concerns regarding potential overloading of the gallery structure, as the inertia forces associated with an acceleration of $a_z = 8.99 \text{ m/s}^2$ (Table) could have led to a substantial overload of this structure. However, the structure exhibited a high damping ratio, as the amplitude of these exceptional vibrations reached only $u_z = 5.6 \text{ mm}$ (Table). Consequently, the additional stresses induced in the trusses by such a vertical displacement were not significant. The maximum static vertical deflection of the lattice span did not exceed 80 mm. The high variability of acceleration and vibration amplitudes in the gallery was influenced by the inevitable fluctuation of the conveyor belt payload (capacity) Q , as illustrated in Figure 4 for one of the measurement periods. During other periods, the payload variability was even greater.

Strain gauge stress measurements in the vertical trusses of the gallery span

The vibration measurement results for the tested end span of the gallery following its retrofitting raised concerns regarding the fatigue life of the load-bearing structure over the anticipated further twenty-year operating period. Consequently, electrical resistance strain gauges T1–T6 (Figure 3) were installed on the top chord (T1, T2) and bottom chord (T3, T4) of

Values of average and exceptional accelerations a_z and accompanying amplitudes u_z of vertical vibrations of the analysed gallery span
Wartości średnich i wyjątkowych przyspieszeń a_z oraz towarzyszących amplitud u_z drgań pionowych analizowanego przęsła galerii

Session No./ Nr sesji	Capacity Q [t/h]/ Wydajność Q [t/h]	Mean values/ Wartości średnie		Extreme values/ Wartości wyjątkowe	
		a_z [m/s ²]	u_z [mm]	a_z [m/s ²]	u_z [mm]
1	2000	0.079	0.039	–	–
2	2500	0.046	0.017	8.310	6.396
3	0	0.486*	0.491*	–	–
4	2800	0.075	0.021	–	–
5	3000	0.042	0.012	0.768	0.762
6	3300	0.046	0.011	8.993	5.606
7	5000	0.071	0.029	–	–
8	3500	0.083	0.028	–	–

*) single measurement/pojedynczy pomiar

rębnie w tabeli, nie wliczając do wartości średnich. Te wyjątkowe chwilowe wartości przyspieszenia budziły niepokój o ewentualne przeciążenie konstrukcji galerii, gdyż siły bezwładności przy przyspieszeniu $a_z = 8.99 \text{ m/s}^2$ (tabela) mogły doprowadzić do znacznego przeciążenia konstrukcji. Wykazała się ona jednak dobrym współczynnikiem tłumienia, gdyż amplituda drgań wyjątkowych wynosiła wtedy tylko $u_z = 5.6 \text{ mm}$ (tabela). Dodatkowe naprężenia w kratownicach, towarzyszące takiemu pionowemu przemieszczeniu, nie były więc duże. Pionowe ugięcie kratowego przęsła od maksymalnych obciążeń statycznych nie przekraczało 80 mm. Na dużą zmienność przyspieszenia i amplitud drgań galerii miała wpływ nieunikniona zmienność załadunku (wydajności) Q taśmy przenośnika, którą pokazano na rysunku 4 w jednym z okresów pomiarowych. W innych okresach zmienność załadunku była jeszcze większa.

Tensometryczne pomiary naprężeń w pionowych kratownicach przęsła galerii

Wyniki pomiarów drgań badanego skrajnego przęsła galerii po jego wzmocnieniu budziły obawy o trwałość zmęczeniową konstrukcji nośnej tego przęsła w przewidywanym okresie dwudziestu lat dalszej eksploatacji. Zainstalowano zatem tensometry elektrooporowe T1 – T6 (rysunek 3) na pasie górnym (T1, T2) i pasie dolnym (T3, T4) kratownicy pionowej oraz na ściągu wzmacniającym (T5, T6) w obu osiach A i B (rysunek 2). Tensometry montowane były podłużnie na pasie górnym (T1, T3, T5) oraz na pasie dolnym (T2, T4, T6) dwuteowych prętów każdej kratownicy i ściągu. Tensometry i aparatura pomiarowa (mostki tensometryczne) pozwoliły na bezpośrednie pomiary amplitudy zmian naprężeń normal-

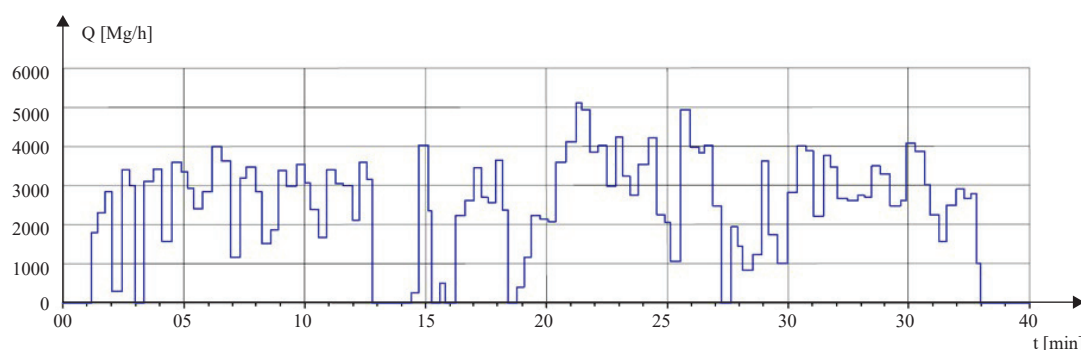


Fig. 4. Loading (capacity) Q of conveyor belt T1 or T2 over a period of 40 minutes
Rys. 4. Załadunek (wydajność) Q taśmy przenośnika T1 lub T2 w okresie 40 minut

the vertical truss, as well as on the retrofitting tie rod (T5, T6) along both axes A and B (Figure 2). The strain gauges were mounted longitudinally on the top flange (T1, T3, T5) and bottom flange (T2, T4, T6) of the I-section members of each truss and tie rod. The strain gauges and measuring equipment (strain gauge bridges) allowed for direct measurements of normal stress range amplitudes at selected locations (Figure 3) of the lattice span structure during various operational states of conveyors P1 and P2. Measurements were carried out across a total of four sessions, each lasting approximately three hours. Readings from all strain gauges were recorded simultaneously, separately for each of the two vertical trusses. Within a single second, the measuring equipment was capable of logging at least 40 readings from each strain gauge. The stress range fluctuations (spectra) were not uniformly varying and exhibited an irregular pattern (Figures 5–8).

Addition to the forced vertical vibrations of the entire truss—which induced variable axial forces in its chords—independent vertical flexural vibrations of the truss chords also occurred between nodes, giving rise to local chord bending. The measured stress values thus resulted from the combined effects of these vibrations. Vibrations of the internodal segments of the bottom chords (HEB340) were minor, as they were stiffened by the reinforced concrete floor slab. The lightweight roof of the gallery did not effectively stiffen the top chords

nych w wybranych miejscach (rysunek 3) kratowej konstrukcji przeszła podczas różnych stanów eksploatacyjnych przenośników P1 i P2. Pomiary wykonywane były łącznie w czterech sesjach, trwających po ok. 3 h każda. Odczyty z wszystkich tensometrów wykonywane były jednocześnie, osobno w przypadku każdej z dwóch kratownic pionowych. W ciągu jednej sekundy aparatura pomiarowa była w stanie zarejestrować co najmniej 40 wskazań z każdego tensometru. Zmiany naprężeń (widma) nie miały charakteru jednostajnie zmiennego i były nieregularne (rysunki 5–8).

Oprócz wymuszonych pionowych drgań całej kratownicy, wywołujących zmienne siły osiowe w jej pasach, występowały też niezależne pionowe drgania giętne pasów kratownic pomiędzy węzłami, wywołującymi lokalne zginanie pasów. Wartości mierzonych naprężeń wynikały więc z łącznych efektów tych drgań. Drgania międzywęzłowych odcinków pasów dolnych kratownic (HEB340) były niewielkie, gdyż usztywniała je żelbetowa płyta podłogi. Lekki dach galerii nie usztywniał skutecznie pasów górnych (HEB450), dlatego też wartości amplitud naprężeń w pasie górnym każdej z kratownic pionowych były wyraźnie większe niż w pasie dolnym. Ściąg wzmacniający (HEA280) też wykazywał giętne drgania pionowe. Przy eksploatacji przenośnika z pustą taśmą (rysunek 6) widać, że w pasie dolnym i w ściągach nie ma praktycznie zmiany naprężeń σ_N , ale występują duże zmiany

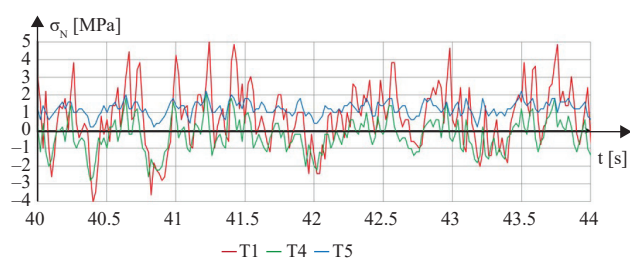


Fig. 5. Changes in normal stresses σ_N in truss bars in axis B at a capacity of $Q = 1200$ Mg/h of conveyor P2 over a period of 4 seconds, $a_z = 0,100$ m/s², $u_z = 0,031$ mm

Rys. 5. Zmiana naprężeń normalnych σ_N w prętach kratownicy w osi B, przy wydajności $Q = 1200$ Mg/h przenośnika P2 w okresie 4 s, $a_z = 0,100$ m/s², $u_z = 0,031$ mm

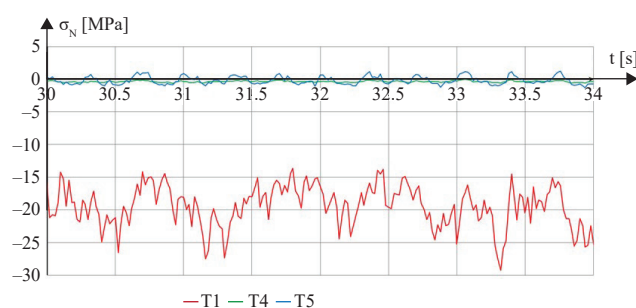


Fig. 6. Changes in normal stresses σ_N in truss bars in axis A at a capacity of $Q = 0$ Mg/h of conveyor P1 over a period of 4 seconds, $a_z = 0,100$ m/s², $u_z = 0,031$ mm

Rys. 6. Zmiana naprężeń normalnych σ_N w prętach kratownicy w osi A przy wydajności $Q = 0$ Mg/h przenośnika P1 w okresie 4 s, $a_z = 0,068$ m/s², $u_z = 0,010$ mm

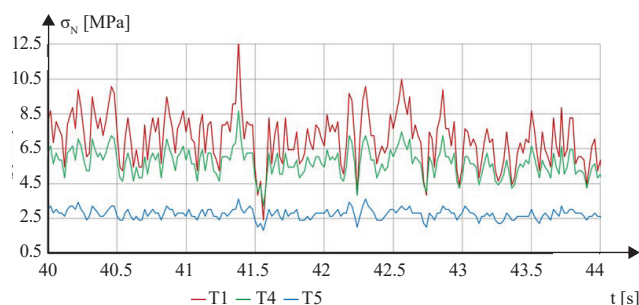


Fig. 7. Changes in normal stresses σ_N in truss bars in axis B at a capacity of $Q = 5800$ Mg/h of conveyor P1 over a period of 4 seconds

Rys. 7. Zmiana naprężeń normalnych σ_N w prętach kratownicy w osi B przy wydajności $Q = 5800$ Mg/h przenośnika P1 w okresie 4 s

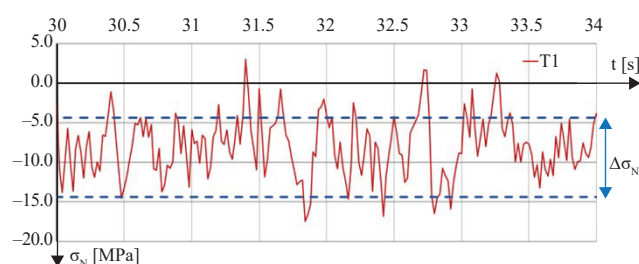


Fig. 8. Changes in normal stresses σ_N in the upper chord of the truss in axis A at a capacity of $Q = 3200$ Mg/h of conveyor P2 over a period of 4 seconds

Rys. 8. Zmiana naprężeń normalnych σ_N w pasie górnym kratownicy w osi A przy wydajności $Q = 3200$ Mg/h przenośnika P2 w okresie 4 s

(HEB450); consequently, the stress range amplitudes in the top chord of each vertical truss were noticeably higher than those in the bottom chord. The retrofitting tie rod (HEA280) likewise exhibited vertical flexural vibrations. During conveyor operation with an empty belt (Figure 6), it can be observed that virtually no stress fluctuations σ_N occur in the bottom chord or in the tie rod, whereas significant stress variations arise in the top chord (T1) due to the excitation of internodal flexural vibrations.

In each of the measurement cycles, irregular normal stress range amplitudes $\Delta\sigma_N$ occurred, with the largest values observed in the top chords of the vertical trusses. The averaged value of these amplitudes $\Delta\sigma_N$, determined as illustrated in Figure 8, amounted to $\Delta\sigma_N = 6.2$ MPa for the top chords of both vertical trusses. In the bottom chords, this averaged amplitude was smaller, reaching $\Delta\sigma_N = 3.6$ MPa, while in both tie rods it measured only $\Delta\sigma_N = 1.7$ MPa. The $\Delta\sigma_N$ values were obtained through laborious analyses covering the entire approximately 12-hour measurement period, taking into account the peak $\Delta\sigma_N$ amplitude values from each hour of measurement.

Fatigue capacity analyses of the gallery span structure

An approximate fatigue strength evaluation of the lattice load-bearing structure of the gallery span was conducted following its retrofitting (Figure 3). The averaged stress range amplitude values $\Delta\sigma_N$ were treated as a regular spectrum comprising larger and smaller amplitudes, as described in Clause 7.1 of standard [3]. The nodes of the analyzed trusses feature T-butt welds or bolted lap joints. In accordance with standard [3], the detail category of such connections corresponds to the lowest reference fatigue strength of $\Delta\sigma_c = 36$ MPa provided within this standard. The number of load cycles for the tested lattice structure exceeded $N = 1 \times 10^8$; therefore, during the subsequent operating period, the notches $N = 1 \times 10^8$ will exhibit a constant fatigue endurance limit $\Delta\sigma_L$. Taking into account the provisions of standard [3], including the variability of stress range amplitudes (deviating from the mean $\Delta\sigma_N$), the value of $\Delta\sigma_N$ was established using the formula:

$$\Delta\sigma_L = 0,737 \times 0,549 \times \Delta\sigma_c = 0,404 \times \Delta\sigma_c \quad (1)$$

In the analyzed case, a value of $\Delta\sigma_L = 14,5$ MPa was obtained. The standard safe-life method was applied, adopting a partial factor for fatigue strength of $\gamma_{Mf} = 1,35$ and a partial factor for fatigue loading of $\gamma_{Ff} = 1,5$. Equivalent constant amplitude stress ranges $\Delta\sigma_{E,2}$ were not determined; instead, the following simplified (estimated) load-capacity condition was used:

$$\gamma_{Ff} \times \Delta\sigma_N \leq \Delta\sigma_L / \gamma_{Mf} \quad (2)$$

The stress range variability at the truss nodes (notches) is not greater than the stress range variability in the structural members, as these connections exhibited a distinctly higher safety margin than the members themselves. Therefore, with

naprężeń w pasie górnym (T1) na skutek wzbudzenia międzywęzłowych drgań giętych.

W każdym z cykli pomiarowych występowały nieregularne amplitudy zmian naprężeń normalnych $\Delta\sigma_N$, a największe dotyczyły pasów górnych kratownic pionowych. Uśredniona wartość tych amplitud $\Delta\sigma_N$, wyznaczanych w sposób pokazany na rysunku 8, wynosiła w przypadku pasów górnych obu pionowych kratownic $\Delta\sigma_N = 6,2$ MPa. W pasach dolnych ta uśredniona amplituda była mniejsza i wynosiła $\Delta\sigma_N = 3,6$ MPa, a w obu ściągach tylko $\Delta\sigma_N = 1,7$ MPa. Wartości $\Delta\sigma_N$ uzyskano w żmudnych analizach dotyczących całego ok. 12-godzinnego czasu pomiarów, biorąc pod uwagę największe wartości amplitudy $\Delta\sigma_N$ z każdej godziny pomiaru.

Analizy nośności zmęczeniowej konstrukcji przęsła galerii

Wykonano przybliżoną ocenę wytrzymałości zmęczeniowej kratowej konstrukcji nośnej przęsła galerii po jej wzmocnieniu (rysunek 3). Uśrednione wartości amplitud naprężeń $\Delta\sigma_N$ potraktowano jako regularne ich widmo, w ramach którego występują amplitudy większe i mniejsze, o których mowa w p. 7.1 normy [3]. W węzłach analizowanych kratownic znajdują się teowe spoiny czołowe lub śrubowe połączenia zakładkowe. Zgodnie z normą [3], kategorii karbu takich połączeń odpowiada najmniejsza normatywna wytrzymałość zmęczeniowa $\Delta\sigma_c = 36$ MPa, przewidziana w tej normie.

Liczba cykli obciążeń badanej konstrukcji kratowej przekroczyła wartość $N = 1 \times 10^8$, a zatem w dalszym okresie eksploatacji karby będą miały trwałą wytrzymałość zmęczeniową $\Delta\sigma_L$. Uwzględniając postanowienia normy [3], w tym zmienność amplitudy naprężenia (odbiegającej od średniej $\Delta\sigma_N$), wartość $\Delta\sigma_L$ ustalono na podstawie wzoru:

$$\Delta\sigma_L = 0,737 \times 0,549 \times \Delta\sigma_c = 0,404 \times \Delta\sigma_c \quad (1)$$

W analizowanym przypadku uzyskano $\Delta\sigma_L = 14,5$ MPa. Zastosowano normową metodę bezwarunkowej żywotności, w przypadku której przyjęto częściowy współczynnik $\gamma_{Mf} = 1,35$, a współczynnik częściowy $\gamma_{Ff} = 1,5$. Nie wyznaczano zredukowanych zastępczych zakresów zmienności naprężenia $\Delta\sigma_{E,2}$, lecz zastosowano następujący uproszczony (szacunkowy) warunek nośności:

$$\gamma_{Ff} \times \Delta\sigma_N \leq \Delta\sigma_L / \gamma_{Mf} \quad (2)$$

Zmienność naprężeń w węzłach kratownic (karbach) nie jest większa niż zmienność naprężeń w prętach, gdyż połączenia te miały wyraźnie większy zapas nośności niż pręty. Przyjęto zatem z pewnym zapasem bezpieczeństwa, że największy zakres zmienności naprężeń w karbach wynosi $\Delta\sigma_N = 6,2$ MPa. Warunek nośności zmęczeniowej (2) jest więc spełniony, gdyż:

$$1,5 \times 6,2 = 9,3 \text{ MPa} < 14,5 / 1,35 = 10,7 \text{ MPa}.$$

Zastosowana metoda jest uproszczona, ale pozwala na szacunkową ocenę trwałości zmęczeniowej kratowego przęsła ga-

a certain safety margin, the maximum stress range amplitude in the notches was assumed to be $\Delta\sigma_N = 6,2$ MPa. The fatigue capacity condition (2) is thus satisfied, since:

$$1,5 \times 6,2 = 9,3 \text{ MPa} < 14,5/1,35 = 10,7 \text{ MPa}.$$

The applied method is simplified; however, it allows for an estimated assessment of the fatigue life of the lattice transport gallery span based on stress range measurements. Advanced analytical methods for evaluating the fatigue strength of steel trusses are presented in [4], whereas the results of direct stress range measurements in the floor beams of a large conveyor drive station are reported in [5], where the resulting stress range $\Delta\sigma_N$ in these beams did not exceed 2 MPa.

Conclusions

Following the retrofitting of the analyzed span, its natural vibration frequency coincided with the frequency of the vibrations induced by the belt conveyors. The span structure was operated under resonance conditions; therefore, the stress range amplitude $\Delta\sigma$ in the structural members and notches could have increased markedly and led to fatigue failure. The strain gauge measurements of the stress ranges $\Delta\sigma_N$ performed on the main truss members under various operating conditions confirmed that, despite the resonance state, the span structure can be operated safely for the planned twenty-year period, as the stress range is not excessively large. The gallery structure thus exhibits reasonably good vibration damping.

Received: 08.04.2026

Revised: 03.06.2026

Published: 23.09.2026

lerii transportowej na podstawie pomiarów zmienności naprężeń. Zaawansowane metody analityczne wytrzymałości zmęczeniowej stalowych kratownic prezentowane są w pracy [4], wyniki bezpośrednich pomiarów zmienności naprężeń w belkach stropu dużej stacji napędowej przenośników w pracy [5], a uzyskany zakres zmienności naprężeń $\Delta\sigma_N$ w tych belkach nie przekraczał 2 MPa.

Wnioski

Po wzmocnieniu analizowanego przęsła nastąpiło zrównanie częstotliwości jego drgań własnych z częstotliwością drgań wymuszonych przez przenośniki taśmowe. Konstrukcja przęsła eksploatowana była w warunkach rezonansu, dlatego też amplituda zmian naprężeń $\Delta\sigma$ w prętach i karkach konstrukcyjnych mogła się zwiększyć wyraźnie i doprowadzić do wyczerpania nośności zmęczeniowej. Wykonane pomiary tensometryczne zakresów zmienności naprężeń $\Delta\sigma_N$ w prętach kratownic głównych, w różnych stanach eksploatacyjnych, pozwoliły na stwierdzenie, że mimo rezonansu konstrukcję przęsła można eksploatować bezpiecznie przez planowany okres dwudziestu lat, gdyż zakres zmienności naprężeń nie jest zbyt duży. Konstrukcja galerii ma zatem dość dobre tłumienie drgań.

Artykuł wpłynął do redakcji: 08.04.2026 r.

Otrzymało poprawiony po recenzjach: 03.06.2026 r.

Opublikowano: 23.09.2026 r.

Literature

- [1] Kocot W. 2020, Przedawaryjny stan galerii transportowej, „Builder” 04 (273). DOI: 10.5604/01.3001.0013.8802.
- [2] Hotała E. Uszkodzenia konstrukcji obiektów elektrowni wskutek wybuchu pyłów. Materiały XXVI Konferencji Naukowo-Technicznej Awaryjne Budowlane, Szczecin-Międzyzdroje 2013, str. 516–522.
- [3] PN-EN 1993-1-9, Eurokod 3, Projektowanie konstrukcji stalowych, Część 1–9: Zmęczenie.

- [4] Kulpa M, Siwowski T. Ocena trwałości zmęczeniowej kratowniczego mostu stalowego po awarii. Materiały XXVI Konferencji Naukowo-Technicznej Awaryjne Budowlane Szczecin-Międzyzdroje 2013, str. 945–952.
- [5] Hotała E, Rykaluk K. Zagrożenia awaryjne stalowych konstrukcji obiektów energetycznych po modernizacji, Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej Nr 90, seria: Studia i Materiały Nr 19, „Budownictwo w Energetyce”, Wrocław 2008, s. 83–98.