

PAWEŁ KOSSAKOWSKI

Kielce University of Technology

e-mail: kossak@tu.kielce.pl

ASSESSMENT OF ENDURANCE RESERVES OF STEEL CRANE BEAMS BEING UNDER LONG-TERM OPERATION

Abstract

This article includes issues related to the estimation of fatigue strength of structural elements subjected to the cyclic variables loads. The results of the assessment of the fatigue strength reserves of steel beams subjected to long-term operation of crane are presented. This evaluation was made in connection with the change in utility plant and replacement of cranes resulting in increasing their loads. The assessment was based on advanced numerical analysis of crane beams subjected to the fatigue, which enabled the detection of regions particularly dangerous, exposed on the possible damage. The results of numerical analysis have been fully confirmed during the examinations, as many parts were damaged in the places indicated in the calculations. The result of the work was to develop a program and repair project as well as strengthening of crane beams together with detailed guidelines for their operation.

Keywords: endurance reserves, fatigue, crane support beams, cyclic variables loads.

1. INTRODUCTION

Evaluation of the fatigue strength reserves is a basic requirement to a number of systems and elements operating over a long period on the occurrence of cyclic variables loads. For objects operating for a long time the material properties change due to aging. As a consequence of this phenomenon, in many cases, the load-bearing capacity of particular elements may decrease considerably, making a structure unsuitable for safe use. As is well known, beam crane works under cyclic variable loads and because of this fundamental parameter determining the endurance capacity is the fatigue strength of the material from which they are made. Hence, the need to undertake research in this area and present the results of analyses carried out in relation to real, operating elements.

As mentioned, in the elements operating under cyclic variable loads cyclically variable stress occurs, resulting in the development of fatigue. Two ranges of fatigue depending on the load and durability are defined:

- low-cycle fatigue, when low durability of elements is caused by high-level loads,
- high-cycle fatigue, when high durability of elements is caused by low-level loads.

Different mechanisms of failure define these types of fatigue, depending on the loads. The low- and the high-cycle fatigue range are divided by line at the point where the fatigue curve, plotted in the natural coordinates, goes from convex to concave. Only the high-cycle fatigue is taken into account in the design codes [1], and the point of origin is assumed to be $N = 10^4$ cycles [2]. The Wöhler curve, which is the basic diagram used in fatigue analyzes, shows the relationship between the high-cycle fatigue strength $\Delta\sigma$ and the number of cycles N . It is plotted in the logarithmic coordinates, but the non-linear relationship can be replaced by linear sections $\Delta\sigma(N)$.

2. FATIGUE STRENGTH

According to the design standard PN-90/B-03200 [1] the fatigue curve $\Delta\sigma_R(N)$ is divided by three sections, limited by the characteristic values of the number of cycles, N (Fig. 1). The first two sections cover the ranges of the so-called limited fatigue strength $\Delta\sigma_R$, dependent on the number of cycles, N , while the third section cover the range of the so-called unlimited (permanent) fatigue strength $\Delta\sigma_L$ which is independent on the number of cycles, N .

The first section of the $\Delta\sigma_R(N)$ is defined for the range $N = 10^4 \div 2 \cdot 10^6$, and for characteristic number

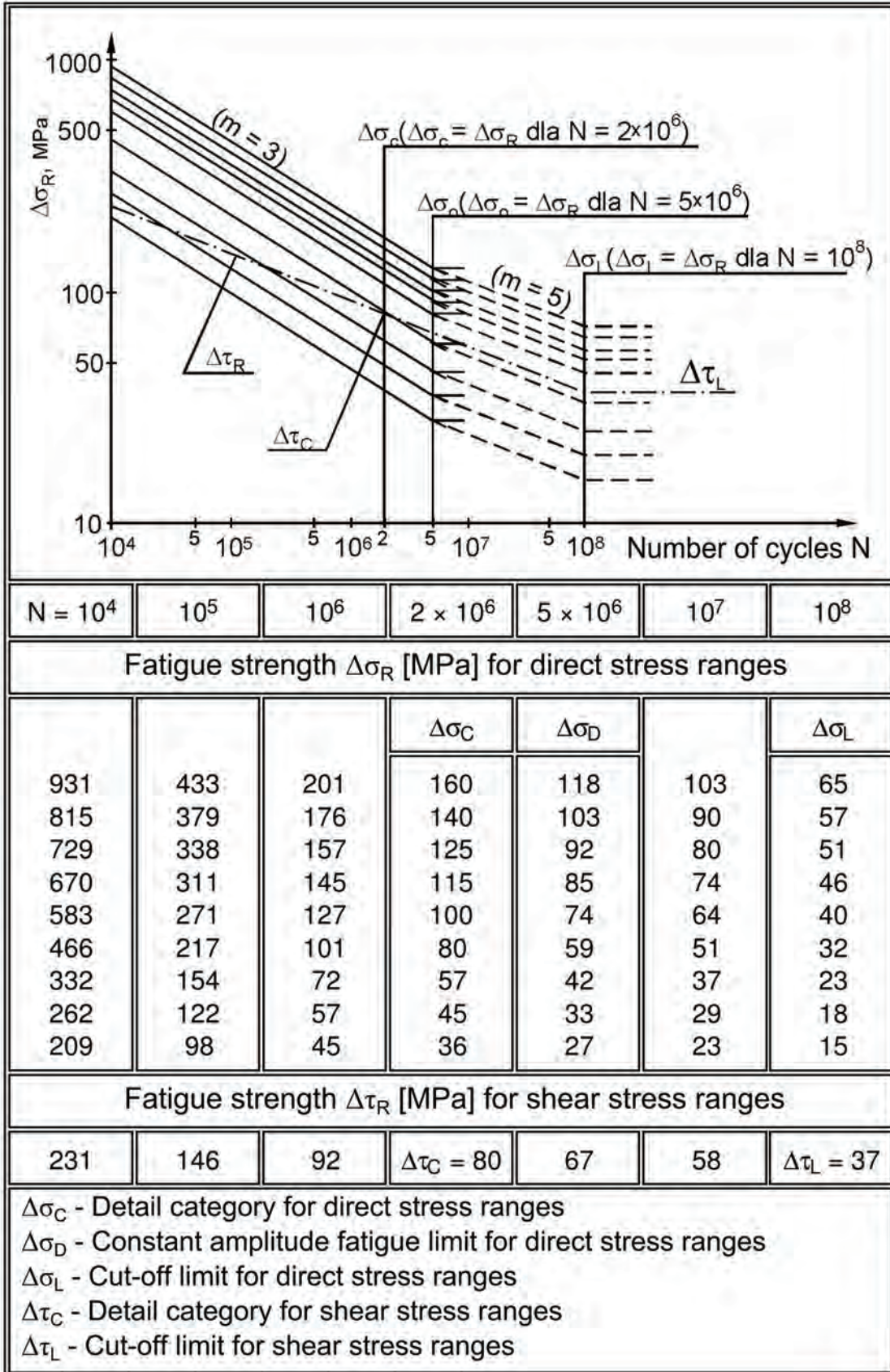


Fig. 1. Fatigue strength curves for specific number of cycles N according to [1]

of cycles $N_C = 2 \cdot 10^6$, the so-called standard fatigue strength $\Delta\sigma_C$ is determined during the laboratory tests. The standard fatigue strength is also referred to as fatigue (detail) category or normative fatigue strength. There are several detail categories $\Delta\sigma_C$, assigned to a specific element and a specific stress direction that indicates the curve to be used for assessing fatigue.

The second section of the limited fatigue strength $\Delta\sigma_R$ is represented in the range of $N = 2 \cdot 10^6 \div 5 \cdot 10^6$. The number of cycles $N_D = 5 \cdot 10^6$, corresponding to the constant-amplitude permanent fatigue strength $\Delta\sigma_D$, is the limit for the range of variation of normal stresses at a constant amplitude below where there is no fatigue damage.

The third section of the fatigue curve is defined by the range of unlimited (permanent) fatigue strength $\Delta\sigma_L$. The number of cycles $N_L = 10^8$ characterizes the cut-off limit $\Delta\sigma_L$. The stress variation does not affect the accumulation of damage below the number of fatigue cycles $N_L = 10^8$.

The $(\log \Delta\sigma_R) - (\log N)$ curves for each category of fatigue are expressed as a range of variation of normal stresses, defining the fatigue strength. Figure 1 shows the curves of fatigue strength for the normal stress variation corresponding to the categories of fatigue $\Delta\sigma_C = 36\text{-}160$ MPa for the various components shown in the table Z3-1 in PN-90/B-03200 standard [1].

3. THE FATIGUE ASSESSMENT OF CRANE BEAMS

3.1. Construction of the crane beams

The crane beams in the production hall were the subject of the assessment, which was made. Before modernization the production hall was designed for the products storage. After the rebuilding the hall was assumed to utility production and storage of products and as the social segment for workers.

The crane beams were made in the 50s' and 70s' of the XX century. They were made of welded sheet metal with a I-beam shape cross-section. The construction of the platforms was made of the checker plate arranged on the grid of angle profiles. Crane beams were based on steel columns and connected with each other.

All crane beams were distinguished due to the dimensions and the shape into 4 types:

- Beam of length $L = 12.0$ m, height 1650 mm, with a platform of width $B \approx 1000$ mm
- Beam of length $L = 12.0$ m, height 1650 mm, with a platform of width $B \approx 1500$ mm
- Beam of length $L = 6.0$ m, height 1650 mm, with a platform of width $B \approx 1000$ mm

- Beam of length $L = 6.0$ m, height 950 mm, with a platform of width $B \approx 1200$ mm

The figures below show one of the crane beam and its construction scheme.

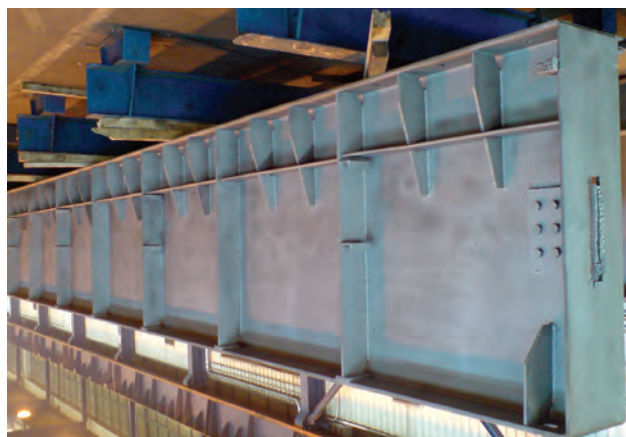


Fig. 2. The side view of one of the crane beams

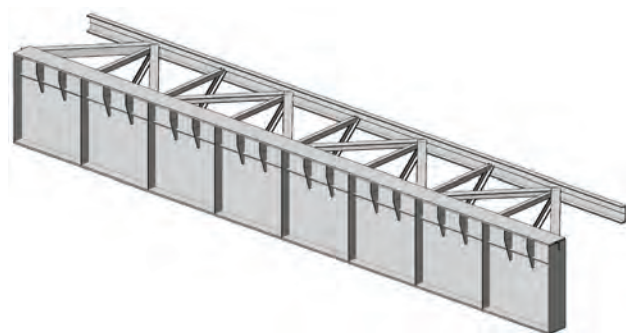


Fig. 3. The construction scheme of one of the crane beams

The modernization project assumed that the cranes will be used according to their current function, but the loads will be changed due to the installation of new cranes with lifting capacity of 40 tons and 20 tons each. Thus, the technical assessment of crane beams was needed and checking their load capacity in the static and fatigue ranges at expected load-level.

3.2. Assessment of the number of fatigue cycles

Assessment of the bearing capacity of beams in the static range was not a big problem. The real estimation of the strength and the reserve in the fatigue range caused same difficulty. These parameters decided about the suitability for further service, as shown later in this article.

The basic problem of determining the fatigue strength of structures subjected to a long-term operation is to determine the number of fatigue cycles N_0 , to which the structure was subjected. Number of fatigue cycles N_0 has direct impact on the fatigue strength of the normal stress $\Delta\sigma_R$ according to the formula:

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_R &= 0.735 \cdot \Delta\sigma_c \left(\frac{5 \cdot 10^6}{N} \right)^{\frac{1}{m}} = \\ &= 0.735 \cdot \Delta\sigma_c \left(\frac{5 \cdot 10^6}{N_0 + N_1} \right)^{\frac{1}{m}} \geq \Delta\sigma_L \end{aligned} \quad (1)$$

where: N – total number of fatigue cycles, N_0 – number of fatigue cycles when the structure was subjected to, N_1 – number of fatigue cycles for further service, $m = 3$ for $N \leq 5 \cdot 10^6$ and $m = 5$ for $N > 5 \cdot 10^6$.

Fatigue strength of shear stress $\Delta\tau_R$ is defined as:

$$\Delta\tau_R = \tau_c \left(\frac{2 \cdot 10^6}{N} \right)^{\frac{1}{5}} = \Delta\tau_c \left(\frac{2 \cdot 10^6}{N_0 + N_1} \right)^{\frac{1}{5}} \geq \Delta\tau_L \quad (2)$$

where: $\Delta\sigma_c$, $\Delta\sigma_L$ – the standard fatigue strength (detail category), and unlimited fatigue strength (cut-off limit), respectively, in the normal stress range, $\Delta\tau_c$, $\Delta\tau_L$ – the standard fatigue strength (detail category), and unlimited fatigue strength (cut-off limit), respectively, in the shear stress range.

The first step in assessing the fatigue strength reserves of crane beams was to estimate the number of fatigue cycles, which were experienced in the course of many years of service. The information provided by the developer indicated that the hall for about 20 years, beginning in about 1975 to 1976, was extensively exploited in the continuous cycle and an annual throughput of about 800 000 tones. A crane used in this period had lifting capacity of 16 tons. It was found that as a result of intensive exploitation an excessive consumption of any fixtures and supports of simply supported crane beams occurred. The crane beams, which were continuously repaired or replaced, were also damaged.

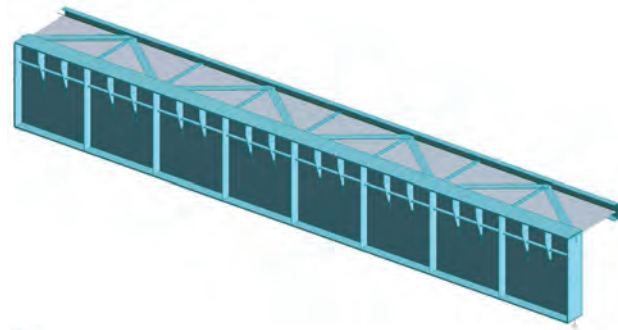
Considering the above, it was assumed that the crane beams have worked under cyclic variables loads for a time. By analyzing the size of the annual throughput of 800 000 tones, data on the level workloads crane with a lifting capacity of 16 tons, it was estimated that during the 20-year life of the crane beams the partial use of the strength of fatigue corresponded to quantity $N_0 = 8 \times 10^5$ cycles. It should be noted that this quantity was assumed with a certain tolerance due to the lack of accurate data on the characteristics of the crane operation during its many years of service.

3.3. Static and fatigue strength analysis of crane beams

The next stage was to carry out calculations of the static and fatigue strength. The modernization

program provides for the use the two cranes with a capacity of 40 tons and 20 tons in parts of the hall of the spacing of columns and lengths of crane beams respectively 12.0 m and 6.0 mm.

Strength calculations were performed using a program based on finite element Autodesk Robot Structural Analysis. The construction of crane beams was modeled with the use of bars in the form of simply supported beam based on the steel columns (Fig. 4). The pinned connection of the truss bracings with the heads of the supporting columns was taken into account. The limit of the vertical, horizontal, and perpendicular to the axis and the rotation around the longitudinal axis of the beam was assumed at the ends.



Rys. 4. Numerical model of one of the crane beams.

In the first step the loads acting on the beam were summarized. The influence of the dynamic interaction of the crane on the crane beam was taken into account by multiplying the vertical forces acting on the wheel contact points with rails overhead by a factor β equal to 1.4. Based on technical information and design standard [3], the following characteristics loads were assumed:

a) maximum vertical forces:

$$V_{max} = \beta \cdot P_{max} = 1.4 \cdot 271 = 379 \text{ kN},$$

b) horizontal forces perpendicular to the track:

$$L = 25\,000 \text{ mm}, e = 5500 \text{ mm} \rightarrow L/e = 4.55 \rightarrow k = 0.2275$$

$$H_{p\,max} = k \cdot P_{max} = 0.2275 \cdot 271 = 61.7 \text{ kN}$$

c) horizontal forces parallel to the track:

$$H_{r\,max} = 0.12 \cdot P_{max} = 0.12 \cdot 271 = 32.5 \text{ kN}$$

d) uniformly distributed service load of the platform

$$p_k = 1.5 \text{ k/m}^2$$

The value of the coefficient to determine the design loads was $\gamma_f = 1.2$.

Long-term part of the crane load for combinations in long-term use of serviceability limit state was calculated by multiplying the vertical forces and the forces perpendicular to the track by a factor $\Psi_d = 0.8$.

In terms of static analysis in any of the four analyzed beams the limit state capacity and use were not exceeded.

As noted previously, for the elements exposed to cyclically variable loads over a period of service, the characteristics which determine their suitability for continued use is the fatigue strength, or rather its reserves. In the later stage of the analysis the reserve of fatigue strength of beams was performed and the strength of the particular parts of the cross section was tested.

Taking into account the assumed number of fatigue cycles, the beams were subjected during the operation to the number of $N_0 = 8 \times 10^5$ cycles.

Taking into account the technical data of the cranes such as group work intensity (GNP) A6, the group of work intensity beams B7 and class loading crane beams K4 was assumed according to [1]. This corresponded to the beam use category H5, at which the number of fatigue cycles was at the level of $N_1 = 5 \times 10^5$ cycles. The total number of fatigue cycles N that the beam will be subjected to in service will be:

$$N = N_0 + N_1 = 8 \times 10^5 + 5 \times 10^5 = 1.3 \times 10^6 \quad (3)$$

Assuming that the maximum and minimum force on one wheel of the crane is $P_{max} = 271$ kN and $P_{min} = 67$ kN, respectively, the spectrum ratio K was determined as:

$$K = 0.5 K_p \left(1 + \frac{P_{min}}{P_{max}} \right) = 0.5 \cdot 0.5 \cdot \left(1 + \frac{67}{271} \right) = 0.624 \quad (4)$$

For the exponent dependent on the number of fatigue cycles $m = 3$ the coefficient of the spectrum inhomogeneity α_m was:

$$\alpha_m = K^{1/m} = 0.624^{1/3} = 0.854 \quad (5)$$

These parameters allowed us to determine theoretical fatigue strength for each of the analyzed parts of the beam cross-sections according to equation (1).

Taking into account the structure of the beams as part of the welded sheets the specific categories of fatigue were adopted. And so, for the welded connection of the upper flange with to the webs, a category $\Delta\sigma_R = 36$ MPa was assumed, which allowed the determination of fatigue strength as:

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_R &= 0.735 \cdot \Delta\sigma_C \left(\frac{5 \cdot 10^6}{N} \right)^{\frac{1}{m}} = \\ &= 0.735 \cdot 36 \left(\frac{5 \cdot 10^6}{1.3 \cdot 10^6} \right)^{\frac{1}{3}} = 41.5 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (6)$$

For the other parts of the crane beam cross section, a category $\Delta\sigma_R = 80$ MPa, was assumed, determining the fatigue strength as:

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_R &= 0.735 \cdot \Delta\sigma_C \left(\frac{5 \cdot 10^6}{N} \right)^{\frac{1}{m}} = \\ &= 0.735 \cdot 80 \left(\frac{5 \cdot 10^6}{1.3 \cdot 10^6} \right)^{\frac{1}{3}} = 92.1 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (7)$$

Then all the characteristic parts of the cross section of crane beams in accordance with the guidelines in [4, 5] were examined. All components of the normal and tangential shear stresses were included, setting the range of variation of reduced stress $\Delta\sigma_{ez}$ as:

$$\Delta\sigma_{ez} = \sqrt{\Delta\sigma_{ex}^2 + \Delta\sigma_{ey}^2 - \Delta\sigma_{ex}\Delta\sigma_{ey} + 3(\Delta\tau_{ev} + \Delta\tau_{es})^2} \quad (8)$$

and the range of variation of principal stresses $\Delta\sigma_{eg}$:

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_{eg} &= \frac{\Delta\sigma_{ex} + \Delta\sigma_{ey}}{2} + \\ &+ \frac{1}{2} \sqrt{(\Delta\sigma_{ex} - \Delta\sigma_{ey})^2 + 4(\Delta\tau_{ev} + \Delta\tau_{es})^2} \end{aligned} \quad (9)$$

where: $\Delta\sigma_{ex}$, $\Delta\sigma_{ey}$ – the ranges of variation of normal stresses, respectively, in directions x and y ; $\Delta\tau_{ev}$, $\Delta\tau_{es}$ – ranges of variation of shear stress on shear and torsion, respectively.

As the calculations have shown, for one of the analyzed crane beam a length of 6.0 m, a platform width of 1.2 m and the web thickness $t = 12$ mm the possibility of the loss of the fatigue strength for a period shorter than the expected life of the crane was found. The loss of the capacity affected the welds connecting the web and the upper flange of the crane beam. Exceeding the fatigue strength was approximately 34% and the strength condition was defined as:

$$\Delta\sigma_e = 55.7 \text{ MPa} > \Delta\sigma_R / \gamma_{fat} = 41.5 \text{ MPa} \quad (10)$$

As a result of the possibility of the loss of the fatigue strength of crane beams, in-depth examination of all components was performed. Many elements had cracks in welds connecting the upper flange and the

webs, confirming the predictions drawn from the results of numerical and stress analysis. Importantly, the diagnosed damages occurred prior to further exploitation of the beams, and hence the corresponding number of fatigue cycles N_0 , where the beams have already been subjected to. In conclusion, the assumed value of $N_0 = 8 \times 10^5$ cycles for some beams was underestimated. The view of beam damage, mainly in the form of cracks in welds connecting the individual elements is shown in the figures below.

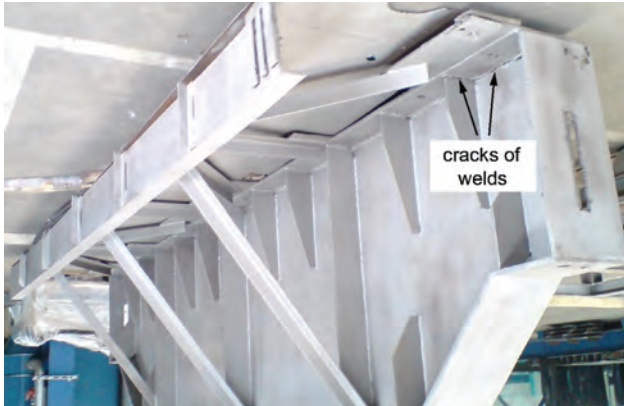


Fig. 5. Damage of one of the crane beams: weld cracks at the interface between the web and ribs and the upper flange

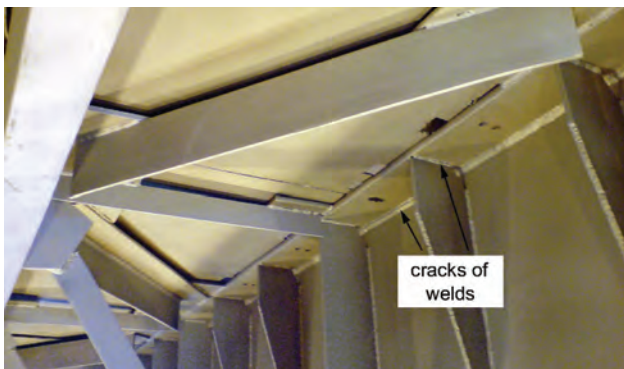


Fig. 6. Damage of one of the crane beams: weld cracks at the interface between the web and ribs and the upper flange

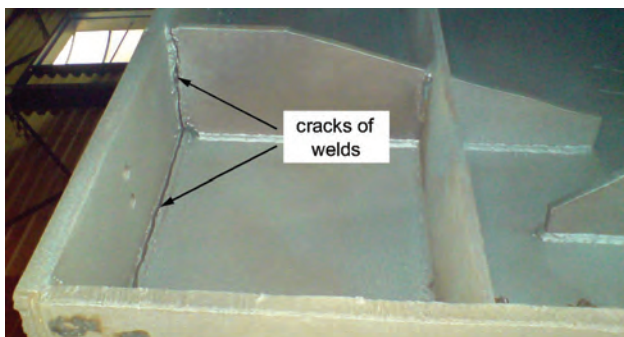


Fig. 7. Cracks in welds connecting the front plate and the webs and ribs found in one of the crane beams

3.4. The results of the work

As stated in the previous chapter, in the case of beams of length $L = 6.0$ m and a platform width $B = 1200$ mm and web thickness $t = 12$ mm the possibility of loss of fatigue strength for a period shorter than the expected life of the crane was found. The loss of the capacity affected weld connections of the web and the upper flanges of the beams. Other elements of the beams meet the requirements for the fatigue strength. Based on the results of the calculations, it was found that all the elements of the other crane beams meet the requirements in the range of the fatigue strength. It should be noted that the analysis was conducted based on the approximate information regarding the use of the hall in previous years. In particular, this relates to the estimation of the partial use of the strength of beams in fatigue at the level of $N_0 = 8 \times 10^5$ cycles.

Analyzing the results of strength calculations, the conditions of the beams and the observed damage, natural necessity was to overhaul all of crane beams including strengthening.

After the renovation works carried out and enhance the strength and re-analysis, it was found that all crane beams meet the requirements for the static and fatigue load for single cranes with a lifting capacity of 40 tones and 20 tones at the assumed period of operation of cranes for the number of cycles $N = 1.3 \times 10^6$. Taking into account above, it was stated that the cranes with lifting capacity of 40 tones and 20 tones can operate with complying the specific operating conditions, which was submitted to the user of the object.

4. SUMMARY AND CONCLUSIONS

As can be seen in the case of elements subjected to cyclic variables loads, the correct estimation of the reserve of fatigue strength is the primary issue. In terms of the static loads crane beams are often oversized and, thus, have reserves of the capacity. The opposite situation occurs with respect to fatigue strength, which in the course of many years of service is progressively reduced. In the case of beams subject to modernization and expected to continue their use the correct issue is to estimate the number of fatigue cycles that the crane beams were subjected to during its operation. As shown in the article, underestimation of this parameter may result in the risk of damage to the beams in shorter time than anticipated. In the present case the fatigue strength was lost at an earlier period, when these elements were used. In the estimation of fatigue issues, it is essential to do a thorough strength analysis, which results in a

detection of the sensitive regions in the structure, in which damage can be expected.

References

- [1] PN-90/B-03200 Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i wymiarowanie.
- [2] Rykaluk K.: *Pęknięcia w konstrukcjach stalowych*. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2000.
- [3] PN-86/B-02005 Obciążenia budowli. Obciążenia suwnicami pomostowymi, wciągarkami i wciągnikami.
- [4] Żółtowski W., Łubiński M.: *Konstrukcje metalowe. Część II*. Arkady, Warszawa 2004.
- [5] Żmuda J.: *Projektowanie torów jezdnych suwnic i elektrowciągów*. Wydawnictwo TiT, Opole 1997.

Paweł Kossakowski

Ocena rezerw wytrzymałości zmęczeniowej stalowych belek podsuwnicowych poddanych wieloletniej eksploatacji

1. WPROWADZENIE

Ocena rezerw wytrzymałości zmęczeniowej jest podstawowym wymogiem, jaki stawiany jest wielu elementom konstrukcyjnym eksploatowanym przez długi okres w zakresie występowania obciążeń wielokrotnie zmiennych. Powszechnie wiadomym jest, że własności materiałowe obiektów eksploatowanych przez długi czas wykazują zmiany wskutek tzw. efektu starzenia. Może zatem zachodzić podejrzenie, że w przypadku wielu elementów ich nośność jest zredukowana, a może nawet niewystarczająca do dalszego bezpiecznego użytkowania. Jak wiadomo belki podsuwnicowe pracują w zakresie obciążeń cyklicznie zmiennych i z tego powodu podstawowym parametrem wytrzymałościowym determinującym ich nośność jest wytrzymałość zmęczeniowa materiału którego są wykonane. Stąd konieczność podejmowania badań w tym zakresie i prezentowania wyników analiz prowadzonych w odniesieniu do elementów rzeczywistych.

Jak wspomniano, w elementach poddawanych działaniu obciążeń wielokrotnie zmiennych powstają cyklicznie zmienne naprężenia, powodujące rozwój zmęczenia. W zależności od wartości obciążeń i trwałości wyróżnia się dwa zakresy zmęczenia:

- zmęczenie niskocyklowe, charakteryzujące się wysokimi wartościami obciążeń, które powodują niską trwałość elementów,
- zmęczenie wysokocyklowe, zachodzące przy niskich poziomach obciążenia, skutkujące wysoką trwałością obciążanych elementów.

Obydwa rodzaje zmęczenia cechują inne mechanizmy zniszczenia, co jest związane z różnym poziomem obciążenia. Granica pomiędzy zmęczeniem nisko- i wysokocyklowym jest określana w punkcie, w którym krzywa zmęczeniowa, narysowana we współrzędnych naturalnych, ulega przegięciu z odcinka wypukłego we wklęsły. W normach projektowych, (np. [1]), nie uwzględnia się zmęczenia niskocyklowego, a jedynie wysokocyklowe, którego punkt początkowy ustalony jest na poziomie $N = 10^4$ cykli [2]. Wykres Wöhlera, czyli zależność wytrzymałości zmęczeniowej wysokocyklowej od liczby cykli, przedstawiany jest we współrzędnych logarytmicznych, co pozwala zastąpić zależność nieliniową przy pomocy odcinków liniowych $\Delta\sigma(N)$.

2. WYTRZYMAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWA

W normie PN-90/B-03200 [1] przyjęto, że wykres zmęczeniowy $\Delta\sigma_R(N)$ składa się z trzech odcinków, ograniczonych charakterystycznymi wartościami liczby cykli N (rys. 1).

Dwa pierwsze odcinki obejmują zakres tzw. ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej $\Delta\sigma_R$, zależnej od liczby cykli N . Pierwszy odcinek wykresu $\Delta\sigma_R(N)$ obejmuje liczbę cykli w przedziale $N = 10^4 \div 2 \cdot 10^6$. Dla liczby cykli $N_C = 2 \cdot 10^6$ prowadzone są badania laboratoryjne celem wyznaczenia tzw. normatywnej wytrzymałości zmęczeniowej $\Delta\sigma_C$, która jest określana również terminem kategorii zmęczeniowej. Jest to wartość liczbowa przypisana określonemu elementowi i określonemu kierunkowi naprężeń, która wskazuje krzywą miarodajną do oceny zmęczenia.

Drugi odcinek zakresu ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej $\Delta\sigma_R$ obejmuje przedział $N = 2 \cdot 10^6 \div 5 \cdot 10^6$, przy czym liczba cykli $N_D = 5 \cdot 10^6$ odpowiada tzw. wytrzymałości trwałej przy stałej amplitudzie $\Delta\sigma_D$. Jest to graniczna wartość zakresu zmienności naprężeń normalnych przy stałej amplitudzie, poniżej której nie występują uszkodzenia zmęczeniowe.

Drugą częścią wykresu zmęczeniowego, a zarazem jego ostatnim odcinkiem, jest zakres obejmujący tzw. nieograniczoną (trwałą) wytrzymałość zmęczeniową $\Delta\sigma_L$, która jest niezależna od liczby cykli N . Definiowana jest ona przy liczbie cykli $N_L = 10^8$ i jest to wartość graniczna $\Delta\sigma$, poniżej której zmienność naprężeń nie ma wpływu na kumulację uszkodzeń.

Na rysunku 1 pokazano krzywe wytrzymałości zmęczeniowej w zakresie zmienności naprężeń normalnych odpowiadającym kategoriom zmęczeniowym $\Delta\sigma_c = 36-160$ MPa dla różnych elementów konstrukcyjnych zamieszczonych w tablicy Z3-1 normy PN-90/B-03200 [1].

Wytrzymałość zmęczeniowa wyrażona zakresem zmienności naprężeń normalnych reprezentowana jest przy pomocy krzywych $(\log\Delta\sigma_R) - (\log N)$ dla danej kategorii zmęczeniowej.

3. OCENA ZMĘCZENIOWA BELEK PODSUWNICOWYCH

3.1. Konstrukcja belek podsuwnicowych

Przedmiotem wykonanej oceny były belki podsuwnicowe hali produkcyjnej. Przed modernizacją hala przeznaczona była do składowania produktów. Po przebudowie program użytkowy hali zakładał produkcję i składowanie produktów oraz segment socjalny dla pracowników.

Belki podsuwnicowe hali były wykonywane w latach 50. i 70. XX wieku. Wykonano je jako spawane z blach o przekroju poprzecznym dwuteowy. Konstrukcję pomostów wykonano się blachy żeberkowej ułożonej na tężniku kratowym z profili kątownikowych z belką ceownikową. Belki podsuwnicowe oparto na słupach stalowych oraz połączono ze sobą.

Z uwagi na wymiary i kształt wyodrębniono 4 typy belek podsuwnicowych:

- belki długości $L = 12,0$ m, wysokości 1650 mm, z pomostem szerokości $B \approx 1000$ mm
- belki długości $L = 12,0$ m, wysokości 1650 mm, z pomostem szerokości $B \approx 1500$ mm
- belki długości $L = 6,0$ m, wysokości 1650 mm, z pomostem szerokości $B \approx 1000$ mm
- belki długości $L = 6,0$ m, wysokości 950 mm, z pomostem szerokości $B \approx 1200$ mm

Na rysunkach 2 i 3 pokazano jedną z belek podsuwnicowych oraz schemat konstrukcyjny.

W ramach projektu modernizacji przewidziano, że belki podsuwnicowe będą nadal użytkowane zgodnie z ich dotychczasową funkcją, jednak zmianie ulegnie obciążenie z uwagi na montaż nowych suwnic o udźwigu 40 ton i 20 ton każda. Stąd ujawniła się konieczność wykonania oceny stanu technicznego belek podsuwnicowych oraz sprawdzenie ich nośności w zakresie statycznym oraz zmęczeniowym dla przewidywanego zakresu obciążeń.

3.2. Ocena liczby cykli zmęczeniowych

Oszacowanie nośności belek podsuwnicowych w zakresie statycznym nie stanowiło większego problemu. Pewną trudnością było natomiast w miarę rzeczywiste określenie wytrzymałości i jej rezerw w zakresie obciążeń zmęczeniowych, co jak pokazano w dalszej części artykułu decydowało o przydatności belek do dalszej eksploatacji.

Podstawowym problemem determinującym wytrzymałość zmęczeniową konstrukcji poddanej wieloletniej eksploatacji jest określenie liczby cykli zmęczeniowych N_0 , którym ta konstrukcja była poddana. Liczba cykli zmęczeniowych N_0 bezpośrednio przekłada się na wytrzymałość zmęczeniową w zakresie naprężeń normalnych $\Delta\sigma_R$ według zależności (1).

Wytrzymałość zmęczeniowa w zakresie naprężeń stycznych $\Delta\tau_R$ określona jest jako (2).

Pierwszym krokiem oceny rezerw wytrzymałości zmęczeniowej belek podsuwnicowych było oszacowanie liczby cykli zmęczeniowych, którym były one poddane w trakcie wieloletniej eksploatacji. Z informacji przekazanych przez inwestora wynikało, że hala przez około 20 lat, począwszy od roku około 1975/76 była intensywnie eksploatowana w cyklu pracy ciągłej i rocznym przerobie około 800 000 ton. Używana w tym okresie suwnica miała udźwig 16 ton. W wykonanej ekspertyzie stanu technicznego belek stwierdzono, że w wyniku intensywnej eksploatacji występowało nadmierne zużycie wszelkich mocowań i podparć swobodnie podpartych belek podsuwnicowych. Ucierpiały również belki podsuwnicowe, które sukcesywnie naprawiono, czy też wymieniano.

Uwzględniając powyższe, założono, że belki podsuwnicowe przepracowały pewien okres czasu w zakresie obciążeń wielokrotnie zmiennych. Analizując wielkość rocznego przerobu na poziomie 800 000 ton, dane dotyczące poziomu obciążeń roboczych suwnicy o udźwigu 16 ton, oszacowano, że w ciągu 20-letniego okresu eksploatacji hali częściowe wyko-

rzystanie wytrzymałości belek w zakresie zmęczenia odpowiadało liczbie $N_0 = 8 \times 10^5$ cykli. Należy jednak zaznaczyć, że wielkość ta została przyjęta z pewną tolerancją z uwagi na brak dokładnych danych dotyczących charakterystyki pracy suwnicy w ciągu jej wieloletniej eksploatacji.

3.3. Statyczna i zmęczeniowa analiza wytrzymałości belek podsuwnicowych

Kolejnym etapem było przeprowadzenie obliczeń wytrzymałościowych w zakresie statycznym oraz zmęczeniowym. Program modernizacji przewidywał użytkowanie dwóch suwnic o nośności 40 ton i 20 ton w częściach hali o rozstawie słupów i długościach belek podsuwnicowych odpowiednio 12,0 m i 6,0 mm.

Obliczenia wytrzymałościowe wykonano przy użyciu programu opartego na metodzie elementów skończonych Autodesk Robot Structural Analysis. Konstrukcję belek podsuwnicowych modelowano jako układ prętowy w postaci belki wolnopodpartej opartej na słupach (rys. 4). Uwzględniono przegubowe połączenie konstrukcji tężnika kratowego z głowicami słupów podporowych. Na podporach skrajnych przyjęto ograniczenie przemieszczeń pionowych, poziomych prostopadłych do osi belki oraz obrotów dookoła osi podłużnej belki. Model przestrzenny uzyskano uwzględniając żeberka usztywniające belki jako elementy łączące belkę z kratownicą pomostu.

W pierwszym kroku zestawiono obciążenia działające na belkę. Wpływ dynamicznego oddziaływania suwnic na belkę podsuwnicową uwzględniono mnożąc siły pionowe działające w punktach styku kół suwnic z szynami przez współczynnik β równy 1,4.

Opierając się na informacjach technicznych suwnic oraz [3], przyjęto następujące obciążenia charakterystyczne:

- maksymalne siły pionowe:
 $V_{\max} = b \cdot P_{\max} = 1,4 \cdot 271 = 379 \text{ kN}$,
- siły poziome prostopadłe do toru:
 $L = 25\,000 \text{ mm}$, $e = 5500 \text{ mm} \rightarrow L/e = 4,55 \rightarrow k = 0,2275$
 $H_{p_{\max}} = k \cdot P_{\max} = 0,2275 \cdot 271 = 61,7 \text{ kN}$
- siły poziome równoległe do toru:
 $H_{r_{\max}} = 0,12 \cdot P_{\max} = 0,12 \cdot 271 = 32,5 \text{ kN}$
- obciążenie użytkowe pomostu równomiernie rozłożone $p_k = 1,5 \text{ k/m}^2$

Wartość współczynnika do określania obciążeń obliczeniowych $\gamma_f = 1,2$.

Długotrwałą część obciążenia zmiennego dźwięnicą dla kombinacji obciążeń długotrwałych w stanie granicznym użytkowania obliczono, mnożąc siły

pionowe oraz siły prostopadłe do toru przez współczynnik $\Psi_d = 0,8$.

W zakresie analizy statycznej w żadnej z 4 analizowanych belek nie stwierdzono przekroczenia stanów granicznych nośności i użytkowania.

Jak już zauważono poprzednio, w odniesieniu do elementów poddawanych obciążeniom cyklicznie zmiennym przez pewien okres eksploatacji charakterystyką decydującą o ich przydatności do dalszego użytkowania jest wytrzymałość zmęczeniowa, a w zasadzie jej rezerwy. W dalszym etapie analizy określono więc rezerwy wytrzymałości zmęczeniowej belek oraz sprawdzono wytrzymałość poszczególnych części przekroju poprzecznego.

Uwzględniając zakładaną liczbę cykli zmęczeniowych, którym belki były poddane w trakcie eksploatacji, przyjęto wartość N_0 na poziomie $N_0 = 8 \times 10^5$ cykli.

Na podstawie danych technicznych suwnic takich jak grupa natężenia pracy suwnic (GNP) A6 przyjęto zgodnie z [1] grupę natężenia pracy belki B7 oraz klasę obciążenia belki podsuwnicowej K4. Odpowiadało to klasie wykorzystania belki H5, przy której liczba cykli zmęczeniowych była na poziomie $N_1 = 5 \times 10^5$ cykli. Całkowita liczba cykli zmęczeniowych N , którym belki będą poddawane w czasie eksploatacji wynosić będzie – wzór (3).

Przyjmując, że maksymalny i minimalny nacisk na jedno koło suwnicy wynosi odpowiednio $P_{\max} = 271 \text{ kN}$ i $P_{\min} = 67 \text{ kN}$ określono współczynnik wypełnienia widma jako (4).

Dla wykładnika zależnego od liczby cykli zmęczeniowych $m = 3$ wyznaczono współczynnik niejednorodności wypełnienia widma (5).

Powyższe parametry pozwoliły na wyznaczenie teoretycznej wytrzymałości zmęczeniowej dla poszczególnych części przekroju poprzecznego analizowanych belek wg zależności (1).

Uwzględniając konstrukcję belek jako elementu spawanego z blach przyjęto odpowiednie kategorie zmęczeniowe. I tak, dla styku spawanego pasa górnego ze środkiem przyjęto wartość $\Delta\sigma_R = 36 \text{ MPa}$, co pozwoliło na określenie wytrzymałości zmęczeniowej na poziomie – wzór (6).

Dla pozostałych części przekroju poprzecznego belki podsuwnicowej przyjęto wartość $\Delta\sigma_R = 80 \text{ MPa}$, określając tym samym wytrzymałość zmęczeniową jako (7).

Następnie sprawdzono wszystkie charakterystyczne miejsca przekroju poprzecznego belek podsuwnicowych zgodnie z wytycznymi zawartymi w [4, 5]. Uwzględniano wszystkie składniki naprężeń

normalnych i stycznych, wyznaczając zakres zmienności naprężeń zastępczych $\Delta\sigma_{ez}$ jako (8) oraz zakres zmienności naprężeń głównych $\Delta\sigma_{eg}$ jako (9).

Jak wykazały obliczenia sprawdzające w przypadku jednej z analizowanych belek podsuwnicowych długości 6,0 m, szerokości pomostu 1,2 m oraz grubości środnika $t_w = 12$ mm stwierdzono możliwość wyczerpania wytrzymałości zmęczeniowej w okresie krótszym niż przewidywany okres eksploatacji suwnicy. Wyczerpanie nośności dotyczyło spoin pachwinowych łączących środnik z pasem górnym belki. Przekroczenie wytrzymałości zmęczeniowej wyniosło około 34%, a warunek nośności określony został jako (10).

W efekcie stwierdzenia możliwości wyczerpania wytrzymałości zmęczeniowej belek podsuwnicowych przeprowadzono szczegółowe badania wszystkich elementów. W wielu elementach stwierdzono pęknięcia spoin łączących pasy górne ze środnikami, co potwierdziło przewidywania wysnute z rezultatów analizy wytrzymałościowej. Co istotne, zdiagnozowane uszkodzenia wystąpiły przed dalszą eksploatacją belek, a więc w zakresie odpowiadającym liczbie cykli zmęczeniowych N_0 , którym belki były już poddane. Stąd wniosek, że zakładana wartość N_0 na poziomie 8×10^5 cykli w odniesieniu do niektórych belek była niedoszacowana.

Widok uszkodzeń belek, głównie w postaci pęknięć spoin łączących poszczególne elementy pokazano na rysunkach 5, 6, 7.

3.4. Wyniki przeprowadzonych prac

Jak podano w poprzednim rozdziale, w przypadku belek o długości $L = 6,0$ m i szerokości pomostu $B = 1200$ mm oraz grubości środnika $t_w = 12$ mm stwierdzono możliwość wyczerpania wytrzymałości zmęczeniowej w okresie krótszym niż przewidywany okres eksploatacji suwnicy. Wyczerpanie nośności dotyczyło spoin pachwinowych łączących środnik z pasem górnym belek. Pozostałe elementy belek spełniały wymagania w zakresie wytrzymałości zmęczeniowej. W oparciu o wyniki obliczeń stwierdzono, że wszystkie elementy pozostałych belek podsuwnicowych są nośne w zakresie wytrzymałości zmęczeniowej. Należy zaznaczyć, że analiza prowadzona była w oparciu o przybliżone informacje dotyczące eksploatacji hali w latach poprzednich. W szczególności dotyczy to oszacowania częściowego wykorzystania wytrzymałości belek w zakresie zmęczenia na poziomie $N_0 = 8 \times 10^5$ cykli.

Analizując wyniki obliczeń wytrzymałościowych, stan techniczny belek oraz stwierdzone uszkodzenia, naturalną koniecznością było przeprowadzenie remontu generalnego wszystkich belek podsuwnicowych obejmującego również fragmentaryczne ich wzmocnienie.

Po przeprowadzonych pracach remontowych i wzmacniających oraz powtórnej analizie wytrzymałościowej stwierdzono, że wszystkie belki podsuwnicowe są nośne w zakresie obciążeń statycznych i zmęczeniowych dla obciążenia pojedynczymi suwnicami o udźwigu 40 ton i 20 ton przy zakładanym okresie eksploatacji suwnic dla liczby cykli $N = 1,3 \times 10^6$. Uwzględniając powyższe, stwierdzono, że suwnice o udźwigu 40 ton i 20 ton mogą poruszać się po torowisku przy spełnieniu szczegółowych warunków eksploatacyjnych, które przedłożono użytkownikowi obiektu.

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Jak widać, w przypadku elementów poddanych oddziaływaniu obciążeń wielokrotnie zmiennych poprawne oszacowanie rezerw wytrzymałości zmęczeniowej jest zagadnieniem podstawowym. W zakresie obciążeń statycznych belki podsuwnicowe często są przewymiarowane i co za tym idzie posiadają znaczne zapasy nośności. Sytuacja odwrotna zachodzi w odniesieniu ich wytrzymałości zmęczeniowej, która w trakcie wieloletniej eksploatacji elementów ulega postępującej redukcji. W przypadku belek podlegających modernizacji i przewidywanych do dalszego użytku kluczowe jest poprawne oszacowanie liczby cykli zmęczeniowych, którym dany element był poddawany w trakcie jego eksploatacji. Jak pokazano w artykule, niedoszacowanie tego parametru może skutkować ryzykiem uszkodzenia elementu w okresie krótszym niż zakładany. W analizowanym przypadku wyczerpanie wytrzymałości zmęczeniowej nastąpiło w okresie wcześniejszym, gdy elementy te były użytkowane. W trakcie szacowania zagadnień zmęczeniowych podstawowe znaczenie ma również przeprowadzenie dokładnej analizy wytrzymałościowej, w wyniku której możliwe jest precyzyjne skazanie miejsc newralgicznych w konstrukcji, w których można spodziewać się uszkodzeń.