
WYBRANE PROBLEMY INŻYNIERSKIE

NUMER 2

INSTYTUT AUTOMATYZACJI PROCESÓW TECHNOLOGICZNYCH
I ZINTEGROWANYCH SYSTEMÓW WYTWARZANIA

Artur DUCHACZEK^{1*}, Zbigniew MAŃKO²

¹ Wyższa Szkoła Oficerska Wojsk Lądowych im. gen. Tadeusza Kościuszki, Wrocław

² Instytut Budownictwa, Uniwersytet Przyrodniczy, Wrocław

* aduchaczek@poczta.wp.pl

BADANIA DOŚWIADCZALNE W ZAKRESIE OBCIĄŻEŃ ZMĘCZENIOWYCH STALOWEGO DŹWIGARA MOSTU WOJSKOWEGO MAJĄCEGO SZCZELINĘ

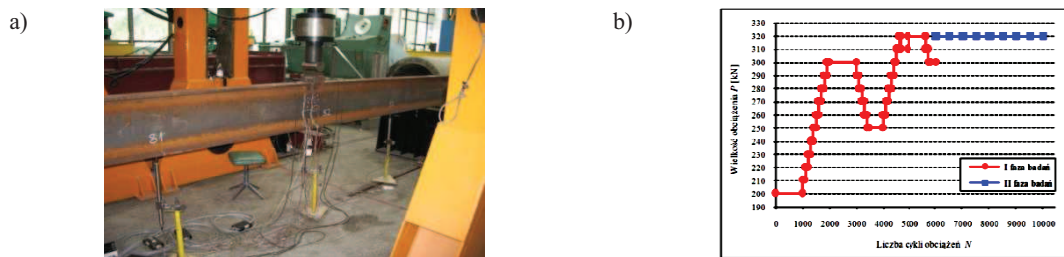
Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki badań doświadczalnych stalowego dźwigara mostu wojskowego w zakresie obciążeń zmęczeniowych. Szczególną uwagę poświęcono wpływowi otworów montażowych i wykonanego pęknięcia zmęczeniowego na rozkład naprężeń w obrębie otworów montażowych usytuowanych w środku dźwigara głównego, które porównano z rezultatami otrzymanymi z przeprowadzonych analiz numerycznych.

1. Wstęp

Od kilku lat teoretyczne i doświadczalne zależności zmęczeniowe sformułowane dla wytrzymałości niskocyklowej są z powodzeniem przystosowywane również do obliczeń wytrzymałości wysokocyklowej. W praktyce obliczeniowej często zachodzi konieczność uwzględniania amplitudy odkształcenia całkowitego $\varepsilon_{a,c}$ o składowych amplitudach odkształcenia sprężystego $\varepsilon_{a,s}$ i plastycznego $\varepsilon_{a,pl}$ [1]. Znajomość tych wielkości oraz zastosowanie znanej metody Palmgren-Minera o sumowaniu uszkodzeń zmęczeniowych [2] umożliwia obliczanie trwałości zmęczeniowej konstrukcji mostowej określoną liczbą cykli koniecznych do jej zniszczenia N_f [3].

Badania doświadczalne dźwigara stalowego przeprowadzono w Pracowni Konstrukcji Budowlanych Laboratorium Badawczego Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej (rys. 1a). Do realizacji obciążenia użyto siłownika firmy *Instron* o maksymalnej sile wymuszającej równej 500 kN. Pomiary odkształceń w miejscach naklejonych czujników tensometrycznych w dźwigarze zrealizowano za pomocą wzmacniacza firmy *Hottinger* typu UPM 100.

Dźwigarem stalowym poddanym badaniom był dwuteownik normalny INP 400 o długości całkowitej 5,60 m, wykonany ze stali gatunku S235JRG2. W celu ustalenia wielkości odkształceń jednostkowych dźwigara podczas badań doświadczalnych użyto tensometrów elektrooporowych typu TFs-5/120 i TFs-15/120 produkcji Pracowni Tensometrii Elektrooporowej TENMEX w Łodzi (rys. 2). Ponadto w środku dźwigara stalowego wykonano cztery otwory montażowe o średnicy 20 mm oraz koncentrator naprężeń (szczelinę) o długości 85 mm.



Rys. 1. Badania zmęczeniowe dźwigara stalowego: a) widok stanowiska badawczego, b) zakres obciążania elementu konstrukcyjnego podczas badań doświadczalnych.

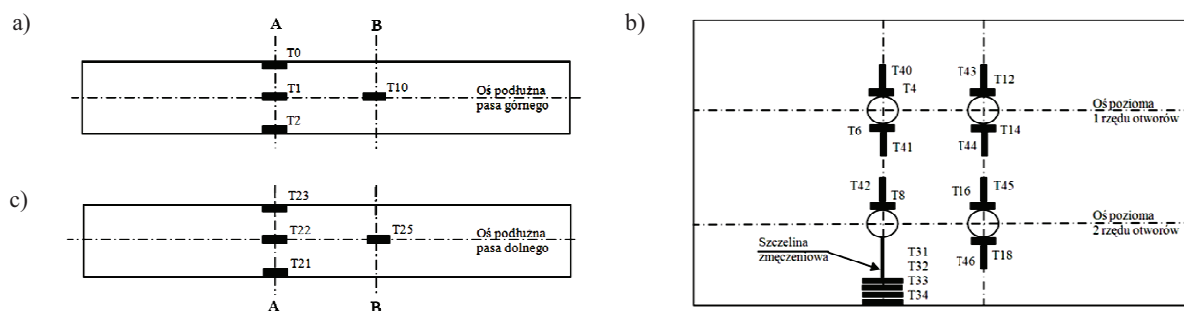
Fig. 1. Fatigue tests of a steel girder: a) a view of the test stand, b) a load range of a structure element during experimental tests.

W trakcie badań dźwigara głównego w laboratorium przyjęto obciążenie graniczne w postaci pojedynczej siły skupionej o wielkości $P_1 = 320$ kN. Zakres obciążania stalowego dźwigara podzielono na dwie podstawowe fazy. Faza I to wstępne testowanie dźwigara i wywołanie początkowej inicjacji pęknięcia w jego środku, natomiast faza II to zasadnicza część badań tego dwuteownika, a więc szczegółowa obserwacja rozwoju uszkodzenia (pęknięcia) powstałego w jego środku.

Wykres zakresu obciążania dźwigara zaprezentowano na rys. 1b. Przyjęto sinusoidalny przebieg obciążania o częstotliwości 0,20 Hz, o wartości minimalnej równej 10 kN oraz maksymalnej w zakresie 200–320 kN. Przyjęte obciążenia wywoływały w dźwigarze zakres zmienności naprężeń normalnych o wartości $\Delta\sigma = 275$ MPa, co było zgodne zarówno z polską stalową normą ogólnobudowlaną PN-90/B-03200, jak i Eurocodem ENV 1993-1-9.

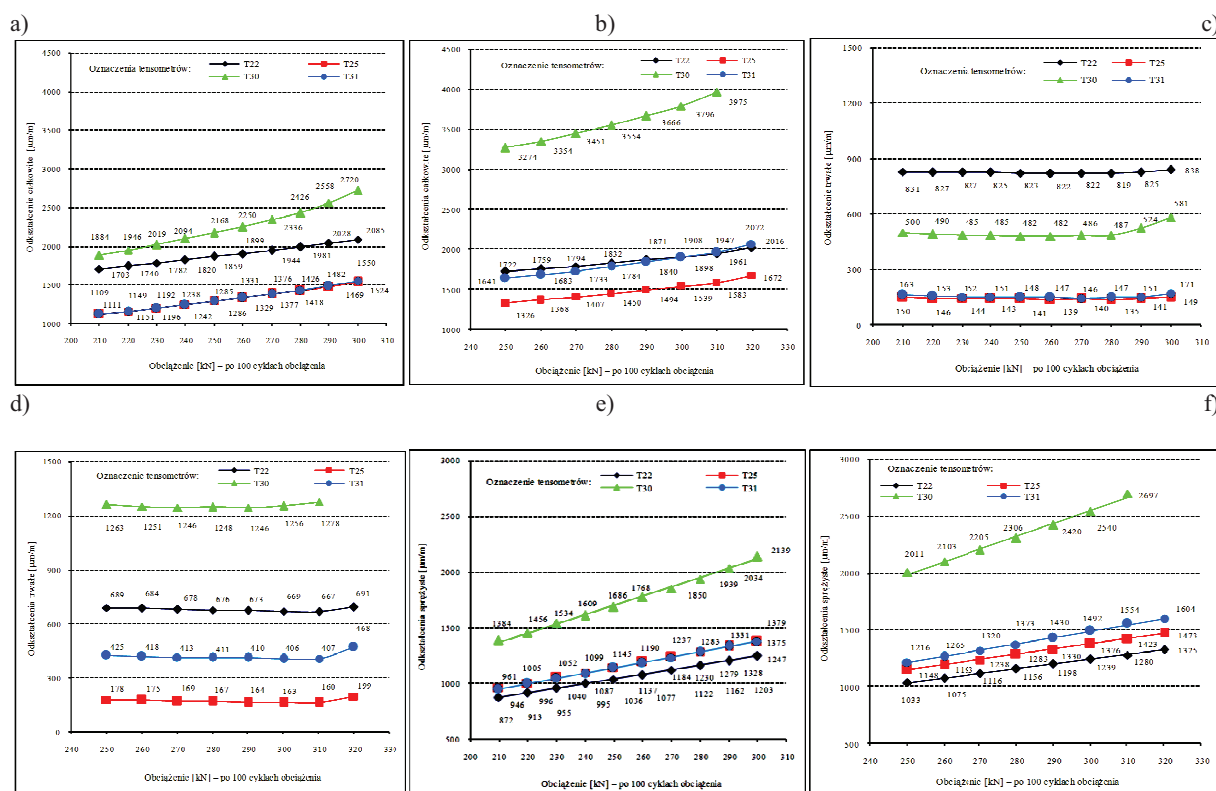
2. Analiza odkształceń podczas inicjacji pęknięcia (I faza)

Pierwsze odczyty odkształceń dokonano po 1000 cyklach obciążenia. Na rys. 3a,c,e zaprezentowano wpływ wielkości obciążenia na wartości odkształceń jednostkowych w wybranych miejscach badanego dźwigara stalowego. Do analizy wybrano tensometry T22 i T25 zlokalizowane na pasie rozciągającym, oraz T30 i T31 usytuowane bezpośrednio pod wykonanym nacięciem. Z wykresów przedstawionych na rys. 3a wynika, że maksymalne wartości odkształceń całkowitych zarejestrowano na tensometrze T30, co było zasadniczo



Rys. 2. Rozmieszczenie oraz numeracja tensometrów elektrooporowych w przekrojach A–A i B–B w osiach pionowych otworów montażowych w dźwigarze głównym w zasadniczej fazie badań w zakresie obciążeń zmęczeniowych na: a) górnym pasie, b) środku, c) dolnym pasie.

Fig. 2. The distribution and numbering of electric resistance wire strain gauges in A–A and B–B sections in the vertical axes of assembly holes in the main girder during the principal phase of tests related to fatigue loads: a) on the top flange, b) in the web, c) on the bottom flange.



Rys. 3. Wykresy wartości odkształceń jednostkowych: całkowitych (a,b), trwałych (c,d) i sprężystych (e,f) uzyskanych na wybranych tensometrach T22, T25, T30 i T31 umieszczonych na dźwigarze stalowym po każdym 100. cyklach obciążeń po zrealizowaniu 1000. (a,c,e) oraz 4000. (b,d,f) cykli obciążenia.
 Fig. 3. The graph showing the values of unit strains: total ones (a,b), plastic ones (c,d) and elastic ones (e,f) from the selected strain gauges T22, T25, T30 and T31 placed on a steel girder after every 100 stress cycles after completing 1,000 (a,c,e) and 4,000 (b,d,f) stress cycles.

zgodne z przyjętymi wcześniej założeniami. Z analizy wykresów zaprezentowanych na rys. 3c wynika z kolei, że wartości odkształceń trwałych zarejestrowanych na tym tensometrze zaczęły znacząco się zwiększać po przekroczeniu obciążenia o wartości 290 kN. Na pozostałych tensometrach nie zaobserwowano jeszcze zdecydowanego przyrostu odkształceń trwałych występujących w rozważanych punktach pomiarowych.

Z wykresów zaprezentowanych na rys. 3e wynika, że największe wartości odkształceń sprężystych otrzymywano na tensometrze T30, co oznacza, że w tym punkcie dźwigara nastąpił największy przyrost odkształceń sprężystych lub mogło to być już spowodowane rozpoczęciem się efektu propagacji powstałej szczeliny.

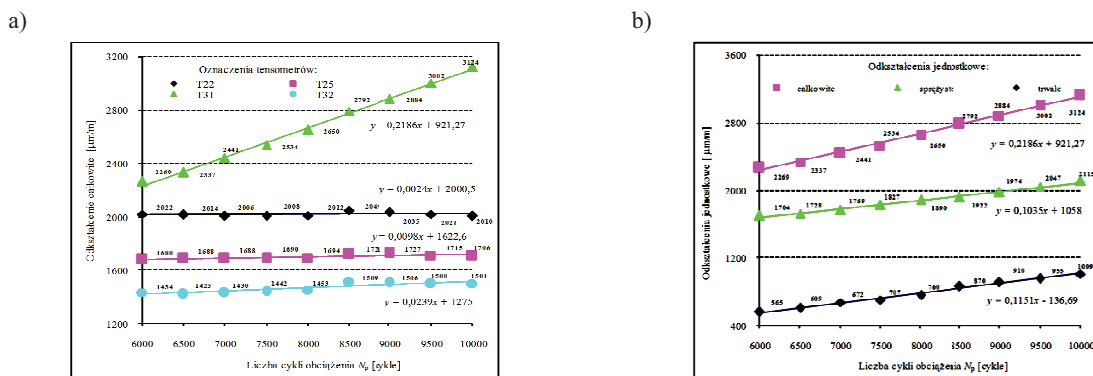
Kolejny blok odczytów odkształceń zrealizowano po 4000. cyklach obciążenia. Na rys. 3b,d,f zaprezentowano wykresy wartości odkształceń jednostkowych również wskazane przez tensometry T22, T25, T30 i T31. Analizując wykresy podane na rys. 3b, zaobserwowano wzrost całkowitych odkształceń jednostkowych wskazywanych przez tensometr T31, które przy obciążeniu skupionym o wielkości 320 kN przekroczyły wartość podobnych odkształceń uzyskanych na tensometrze T22. Świadczyło to o wzroście odkształceń w wierzchołku szczeliny zlokalizowanej w środniku, a może nawet o rozpoczęciu już procesu jej propagacji.

Z kolei, z analizy wykresów zaprezentowanych na rys. 3d wynika, że przy wystąpieniu obciążenia o wartości 320 kN znacznie wzrosły wielkości odkształceń trwałych na wszystkich rozpatrywanych tensometrach. Analizując natomiast wykresy przyrostów sprężystych odkształceń jednostkowych zaprezentowane na rys. 3f, stwierdzono nadal liniowe ich przebiegi, co jest w pełni uzasadnione charakterem przyjętego programu badań doświadczalnych tego dźwigara w zakresie obciążeń zmęczeniowych.

Z analizy wykresów pokazanych na rys. 3a,b wynika jednoznacznie, że wartości całkowitych odkształceń jednostkowych rejestrowane na tensometrze T22 zmniejszyły się, natomiast na tensometrze T25 nieznacznie tylko się zwiększyły. Taka sytuacja mogła być spowodowana zmianą kształtu badanego dźwigara (a więc zwiększeniem się krzywizny jego linii ugięcia) pod wpływem przyłożonego obciążenia, a przez to zwiększeniem się wartości odkształceń rejestrowanych przez tensometr T22. Natomiast wartości odkształceń jednostkowych całkowitych rejestrowanych na tensometrach T30 i T31 znacznie się zwiększyły (rys. 3a,b), przy czym zaobserwowano, że były one odwrotnie proporcjonalne w stosunku do odległości położenia danego tensometru od wierzchołka szczeliny, tzn., że im tensometr położony był bliżej tego wierzchołka to przyrost odkształceń jednostkowych był większy.

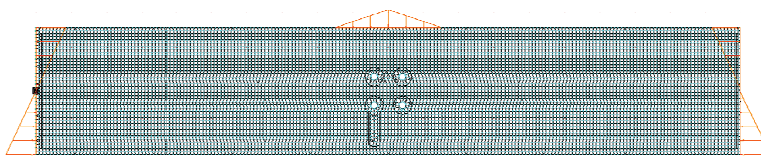
W II fazie przeprowadzonych badań doświadczalnych pomiary odkształceń jednostkowych wykonane zostały przy stałym obciążeniu, w postaci pojedynczej siły skupionej o maksymalnej wartości 320 kN. Pozostałe parametry obciążenia nie uległy zmianie w porównaniu z badaniami wykonanymi w I fazie. Wybrana do dalszych badań doświadczalnych końcowa wartość obciążenia powodowała widoczny już przyrost wartości pęknięcia (szczeliny) w środku, a jednocześnie nie spowodowała jeszcze wystąpienia „płynięcia” całego dźwigara.

Na rys. 4a przedstawiono wykresy całkowitych odkształceń jednostkowych w zależności od liczby cykli obciążenia. W analizie wzięto pod uwagę tensometry T22 i T25 znajdujące się na dolnym pasie dwuteownika oraz tensometry T31 i T32 położone bezpośrednio pod wykonanym nacięciem (rys. 2). Wzrost wartości odkształceń jednostkowych występujących na krawędzi dolnej pasa dwuteownika rejestrowany na tensometrach T22 i T25 w porównaniu do wskazań tensometru T31 umieszczonego pod wierzchołkiem szczeliny był nieznaczny. Zauważa się przy tym również, że wraz ze wzrostem liczby cykli obciążenia zaczynały już wzrastać także wartości odkształceń występujących na wysokości położenia tensometru T32, co świadczyło jednoznacznie o wzroście szczeliny zmęczeniowej.



Rys. 4. Wykresy odkształceń jednostkowych na tensometrach: a) T22, T25, T31 i T32, b) T31, w zależności od liczby cykli obciążenia w przedziale 6 000–10 000.

Fig. 4. The graphs of unit strains on strain gauges: a) T22, T25, T31 and T32, b) T31, depending on the number of stress cycles within the 6 000–10 000 range.



Rys. 5. Model obliczeniowy MES badanego dźwigara dla przyjętego schematu obciążenia.
Fig. 5. The FEM model of the researched girder for the adopted stress pattern.

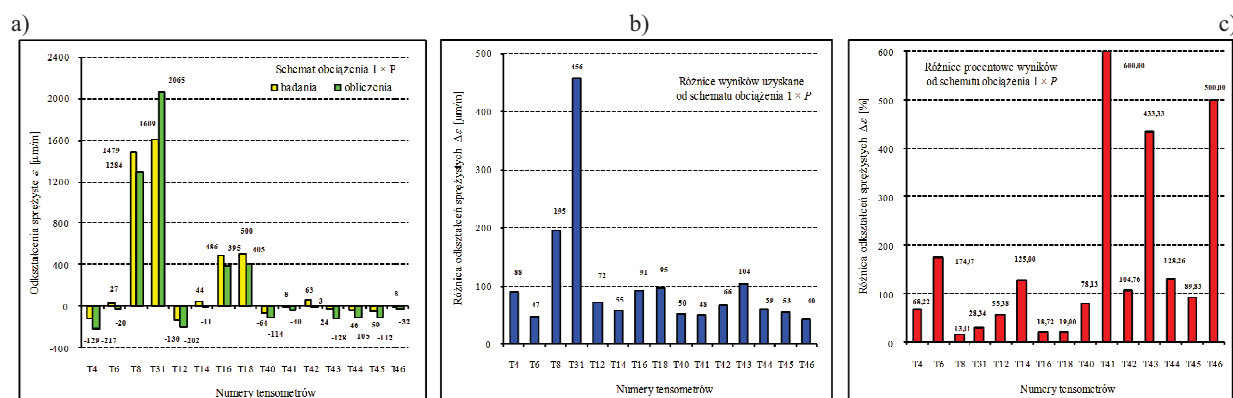
Na rys. 4b przedstawiono przebiegi odkształceń jednostkowych rejestrowanych przez tensometr T31 w zależności od liczby cykli obciążenia w przedziale 6000–10000. Po przeprowadzonej analizie otrzymanych wyników stwierdzono, że na całkowitą wielkość odkształceń jednostkowych wskazywanych na tym tensometrze zdecydowanie większy wpływ miały odkształcenia sprężyste (co było zgodne z oczekiwaniami), jednak wielkość odkształceń trwałych była na tyle duża, że nie powinna być pominięta w analizach zmęczeniowych.

3. Porównanie wyników badań doświadczalnych i analiz numerycznych

W celu zmniejszenia czasochłonności obliczeń przeprowadzono analizę rozkładu naprężeń tylko w samym środku badanego kształtownika, przyjmując do analiz model dźwigara o długości 2,00 m (rys. 5). Zaproponowano, aby analizowany środek poddać obciążeniu liniowemu nierównomiernie rozłożonemu, tj. w kształcie trójkąta równoramiennego o długości 300 mm i wysokości odpowiadającej wartości 2,13 kN/mm. Zastosowano także obciążenie nierównomiernie rozłożone – o kształcie trójkątym, które korygowało wartość momentu zginającego w połowie rozpiętości teoretycznej analizowanego elementu w jego modelu obliczeniowym. Wysokość *trójkąta obciążenia* przyjmowała wartość $\pm 3,55$ kN/mm.

Na rys. 6a przedstawiono wartości odkształceń jednostkowych sprężystych w miejscach występowania wybranych tensometrów w zależności od przyjętego schematu obciążenia P_1 uzyskanych z badań doświadczalnych i analiz przy użyciu MES, natomiast na rys. 6b,c różnice pomiędzy tymi wielkościami, przy czym na rys. 6c różnice wartości odkształceń wyrażono w procentach, przyjmując jako wartość równą 100% wielkość odkształceń jednostkowych odczytaną bezpośrednio z tensometrów umieszczonych w wybranych punktach pomiarowych.

Analizując wykresy zaprezentowane na rys. 6a stwierdzono na tensometrach T6, T14, T41



Rys. 6. Zestawienie wartości odkształceń sprężystych na tensometrach zlokalizowanych na dźwigarze uzyskane z: a) badań i obliczeń MES, b) ich bezpośrednie różnice, oraz c) różnice procentowe.

Fig. 6. The list of the values of elastic strains on the strain gauges placed in the girder obtained from: a) FEM and calculations tests, b) their directly differences and also c) percentage differences.

i T42 występowanie odkształceń o różnych znakach, co świadczyło niestety o niezadawalającym odwzorowaniu rzeczywistych warunków pracy badanej konstrukcji.

Analiza wykresów przedstawionych na rys. 6c pokazuje wyraźnie, że największe procentowe różnice w wartościach odkształceń jednostkowych wskazywały tensometry umieszczone prostopadle do osi głównej dźwigara, co świadczyło o tym, że zastosowany model obliczeniowy dźwigara nie oddawał w sposób zadowalający charakteru pracy tej konstrukcji na tym kierunku rozważań. Wykresy pokazane na rys. 6a wykazują jednak, że wartości odkształceń jednostkowych występujących na kierunku prostopadłym do osi głównej dźwigara były znacznie mniejsze niż na kierunku do niej równoległym, przez co ich wpływ na wartość trwałości zmęczeniowej elementu konstrukcyjnego mostu nie był tak bardzo znaczący.

4. Podsumowanie

Analizy przedstawione w pracy wykazały dość istotny wpływ wykonanych otworów i nacięcia (szczeliny) w środku dźwigara na rozkład naprężeń normalnych w jego przekroju poprzecznym. Zaprezentowane rozważania potwierdziły przyjętą hipotezę, że uszkodzenie środnika dwuteownika w strefie rozciąganej powinno dyskwalifikować go z dalszej bezpiecznej eksploatacji, a przez to nie jest już konieczne przeprowadzanie dalszej analizy rozwoju powstałego pęknięcia w głąb dolnego (rozciąganego) pasa dwuteownika.

Analizując wyniki uzyskane z badań doświadczalnych, należy mieć na uwadze pewne niedoskonałości narzędzi i urządzeń badawczych użytych do pomiarów odkształceń jednostkowych, jakimi były m.in. tensometry elektrooporowe. Jak wiadomo, odczyty z tensometrów uśredniają bowiem wartości odkształceń na długości ścieżki pomiarowej (w tym przypadku z 5 mm lub 15 mm), a zatem nawet bardzo duże wartości odkształceń występujące w wierzchołku szczeliny zmęczeniowej (lub na krawędzi otworu montażowego) podczas odczytu z zastosowaniem tensometrów były automatycznie uśredniane, a przez to otrzymane wyniki w punktach były mniejsze niż w rzeczywistości.

Literatura

1. Kocańda S., Szala J.: Podstawy obliczeń zmęczeniowych. Warszawa: PWN, 1997.
2. Rykaluk K.: Pęknięcia w konstrukcjach stalowych. Wrocław: Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne (DWE), 2000.
3. Kłysz S.: Szacowanie trwałości wybranych materiałów i elementów konstrukcji lotniczych w zakresie rozwoju pęknięć zmęczeniowych. Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, Z-5, Warszawa 1999.

EXPERIMENTAL TESTS IN THE FATIGUE LOADS RANGE OF MILITARY BRIDGE STEEL GIRDER WITH CRACK

Summary: In the paper results of experimental tests on a military bridge steel girder with respect to the fatigue loads were presented. A special attention was paid to the influence of mounting holes and the fatigue crack made on the stress pattern within assembling holes located in the girder web. The results of experimental tests, conducted in lab conditions using an strain gauges, were compared to the results of numerical analyses.