



PRZEMYSŁAW RAKOCZY, *prakoczy2@unl.edu*

ANDRZEJ NOWAK, *anowak2@unl.edu*

University of Nebraska-Lincoln

## KRYTYCZNE OBCIĄŻENIE ZMĘCZENIOWE CIĘŻARÓWKAMI

### CRITICAL TRUCK LOAD FOR FATIGUE FAILURES

**Streszczenie** Problem zmęczenia materiału elementów mostowych jest obecnie główną przyczyną awarii. Pęknięcia zmęczeniowe w mostach powstają znacznie szybciej niż zakładają to normy. Przyczyną takiej sytuacji może być nadal niedostateczna wiedza z zakresu inżynierii materiałowej jak i rzeczywiste obciążenie większe od projektowanego. Artykuł skupia się na analizie obciążenia cyklicznego wywołanego przez ruch ciężkich pojazdów. Znaczący rozwój technologii weigh-in-motion (WIM) w ostatnich latach pozwala na szczegółowe przeanalizowanie ruchu ciężarówek, które wywołują obciążenie cykliczne, a w efekcie zmęczenie materiału w elementach mostowych. Używając sprawdzonych metod analitycznych tj. rain-flow counting oraz teorii Palmgren'a-Miner'a, obliczono oraz porównano z obecnymi kryteriami projektowymi – ilość cykli obciążeniowych wywołany przez pojedynczy pojazd oraz obciążenie równoważne. Przeanalizowano bazę danych pochodzącą ze stacji WIM z różnych stanów i dróg. Całkowita ilość pojazdów zarejestrowana w bazie WIM przekracza 10 milionów.

**Abstract** Fatigue is one of the major causes of failure for highway bridges. Cracking or rupture of components and connections appear faster than design codes assess. Reason of this situation may be lack of knowledge of fracture mechanics or underestimated actual load compared to design fatigue load. This article focuses on cyclic load analysis caused by heavy vehicles. Improvement of data collection technology such as weigh-in-motion (WIM) allows to extensive live load analysis. Using widely accepted theories such as rain-flow counting and Palmgren-Miner formula, number of load cycles per truck and equivalent moment were calculated and compared to current design criteria. Total number of truck records in WIM data base exceeds 10 million.

### 1. Wstęp

Przeciążone ciężarówki są główną przyczyną awarii zmęczeniowych mostów. Pęknięcia elementów nośnych i połączeń wymagają kosztownych napraw lub wymiany. Szacowanie wytrzymałości zmęczeniowej oraz pozostałego czasu użyteczności elementów wymaga znajomości zachowania się materiałów oraz rzeczywistego obciążenia, na jakie element będzie narażony. Obecne badania skupiają się na znalezieniu modelu obciążenia cyklicznego, które będzie odzwierciedlało rzeczywiste warunki, na jakie mosty są narażone. Efekt obciążenia użytkowego tj. statyczny moment zginający został obliczony używając rocznej bazy danych weigh-in-motion (WIM), zawierającej ponad 10 milionów pojazdów.

### 2. Baza danych

Stacje pomiarowe weigh-in-motion (WIM) w przeciwieństwie do tradycyjnych stacji służą do gromadzenia danych o ruchu drogowym wyłącznie do celów badawczych. Kierowcy nie są karani za przekroczenie prędkości lub dozwolonego ciężaru na oś. Ponadto

urządzenia pomiarowe są ukryte w jezdni w taki sposób aby w jak najmniejszym stopniu były zauważalne (rys. 1). Z tego powodu stacje WIM nie są celowo omijane przez przeciążone pojazdy, a dane zebrane w ten sposób odzwierciedlają rzeczywisty ruch drogowy w danym miejscu.



Rys. 1. Elementy pomiarowe stacji WIM ukryte w jezdni

Baza danych została udostępniona przez Ministerstwo Ruchu Drogowego USA (*Federal Highway Administration, FHWA*). Dane zawierają roczne odczyty ze stacji pomiarowych WIM. Stacje WIM mierzą ciężar osi pojazdu, odstęp między osiami, prędkość przejazdu, czas pomiaru oraz typ pojazdu według klasyfikacji FHWA. Dane pochodzą z 17 różnych stanów, z dróg o różnym natężeniu ruchu i lokalizacji (tereny zurbanizowane, tereny wiejskie). Baza zawiera pomiary wyłącznie ciężarówek, pojazdy osobowe zostały pominięte, jako mało istotne z punktu widzenia obciążenia użytkowego mostów.

Dane zostały przefiltrowane w celu usunięcia błędnych odczytów. Ciężarówki, które spełniły poniższe kryteria zostały usunięte z bazy danych:

- ciężar pojedynczej osi ponad 311 kN,
- całkowity ciężar pojazdu poniżej 44 kN,
- całkowita długość pojazdu ponad 61 m,
- całkowita długość pojazdu poniżej 2,1 m,
- pierwszy rozstaw osi poniżej 1,5 m,
- dowolny rozstaw osi poniżej 1 m,
- prędkość poniżej 16 km/h,
- prędkość ponad 160 km/h,
- gdy całkowity ciężar pojazdu różni się od sumy ciężarów wszystkich osi o więcej niż 7%,
- typy pojazdów zakwalifikowanych przez FHWA poniżej 3 (pojazdy osobowe i jednoślady) i powyżej 14 (pojazdy specjalne).

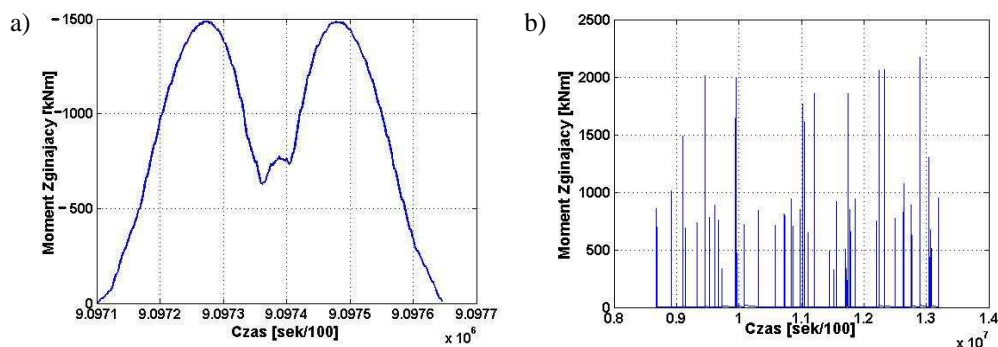
Średnia dzienna oraz całkowita ilość ciężarówek na poszczególnych drogach, po przefiltrowaniu została przedstawiona w tablicy 1.

Tablica 1. Ilości danych w poszczególnych stacjach WIM.

Nazwa Stacji	Ilość Dni Pomiarowych	Średnia Dzienna	Ilość Pojazdów
Arizona SPS-1	365	119	43,344
Arizona SPS-2	365	4039	1,470,357
Arkansas SPS-2	365	4648	1,696,530
Colorado SPS-2	365	983	357,825
Delaware SPS-1	365	591	215,428
Illinois SPS-6	365	2385	868,339
Indiana SPS-6	214	886	323,390
Kansas SPS-2	365	1353	492,462
Louisiana SPS-1	365	253	92,064
Maine SPS-5	365	527	192,295
Maryland SPS-5	365	237	86,453
Minnesota SPS-5	365	164	60,009
New Mexico SPS-1	245	492	179,580
New Mexico SPS-5	245	2524	921,260
Pennsylvania SPS-6	365	4143	1,512,203
Tennessee SPS-6	365	4498	1,641,861
Virginia SPS-1	365	735	268,296
Wisconsin SPS-1	365	636	232,229

### 3. Obciążenie cykliczne

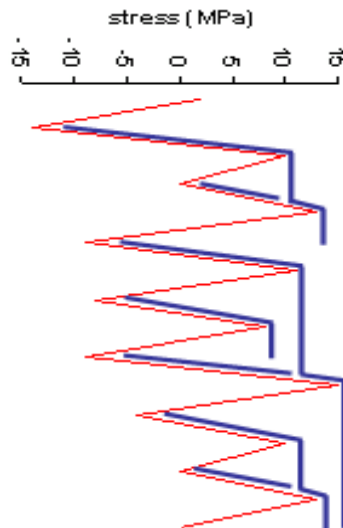
Dla wybranych stacji WIM przeprowadzono analizę statyczną momentu zginającego w mostach, od ruchu ciężarówek. Analizowano moment na środku przęśła dla mostów jedno przęsłowych oraz nad środkową podporą dla mostów ciągłych. Rozpatrywano różne długości przęseł w przedziale od 9 m do 60 m. Jako wynik otrzymano wartości momentu zginającego względem czasu w przeciągu jednego roku. Poniższe rysunki przedstawiają przykładowy wykres momentu dla belki ciągłej dwuprzęsłowej, dla pojedynczej ciężarówki rys. 2a, oraz dla jednej godziny ruchu rys. 2b. Każda pionowa linia na rys. 2b po odpowiednim zbliżeniu ma kształt przybliżony do wykresu na rys. 2a.



Rys. 2. Moment zginający nad środkową podporą dla belki dwuprzęsłowej o rozpiętości przęśła 60 m, a – typowy wykres dla pojedynczego pojazdu, b – wykres dla jednej godziny ruchu

Następnie zastosowano algorytm zliczający cykle obciążenia tzw. „rain-flow counting algorithm” [3] [4]. Rain-flow counting jest powszechnie stosowany do określania cykli z nieregularnych historii obciążenia. Algorytm *rain-flow* jest sugerowaną przez American Standard Testing Methods (ASTM) metodą zliczania cykli obciążenia do analiz zmęczeniowych. Algorytm można opisać za pomocą kilku punktów (rys. 3):

- należy zredukować wykres historii do lokalnych punktów przegięcia funkcji,
- następnie wykres jest odwracany o 90 stopni i w przenośni traktowany jak dach pagody, po którym spływa woda,
- każde lokalne minimum jest źródłem „wody”,
- gdy „woda” dopłyne do lokalnego maksimum spada niżej az do napotkania kolejnej krawędzi po której spływa dalej,
- półcykle są zliczane gdy:
  - „woda” dopłyne do końca wykresu,
  - napotka strumień, który zaczął się wcześniej lub,
  - napotka strumień, który zaczyna się w minimum o większej wartości bezwzględnej,
- czynności należy powtórzyć dla drugiej strony wykresu gdzie źródłami „wody” są lokalne maksima,
- dwa półcykle o takiej samej wartości lecz przeciwnych kierunkach traktowane są jako pełen cykl [4].



Rys. 3. Wizualizacja algorytmu rain-flow dla prawej strony wykresu (źródłami są minima)

Cykle momentu oraz ich wielkości zostały policzone dla poszczególnych stacji WIM. W celu wyeliminowania cykli o bardzo małej amplitudzie, które powodują stosunkowo niewielkie zmęczenie materiału, zastosowano filtry w zależności od długości przęsła. Cykle, które posiadały amplitudy mniejsze niż wartości podane w tabl. 2. zostały usunięte.

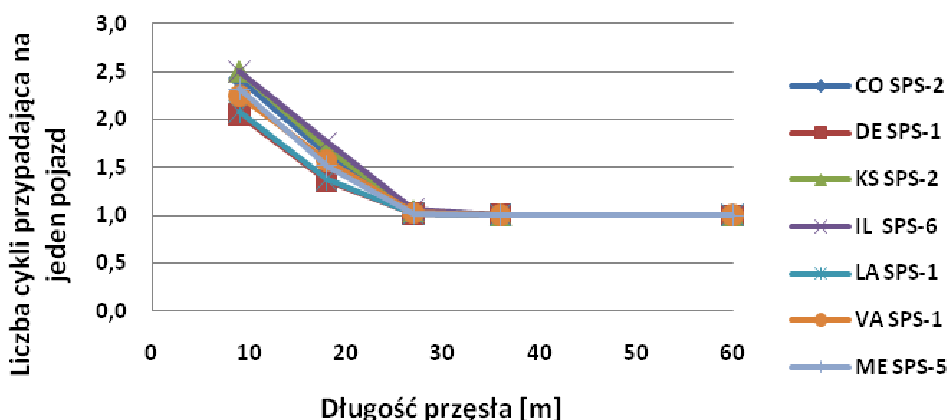
Średnią liczbę cykli obciążenia przypadającą na jedną ciężarówkę otrzymano dzieląc całkowitą ilość cykli przez liczbę pojazdów na danej drodze. W obecnej normie mostowej USA-AASHTO LRFD 2007 przyjmuje się, że dla mostów jednoprzęsłowych ilość cykli wywołanych przez jeden pojazd wynosi 1 dla przęseł większych od 12 m oraz 2 dla przęseł mniejszych od 12 m. Dla mostów wieloprzęsłowych ciągłych przyjmuje się, że ilość cykli

wywołanych przez jeden pojazd w okolicy wewnętrznej podpory wynosi 1,5 dla przęseł większych od 12 m oraz 2 dla przęseł mniejszych niż 12 m [1]. Wyniki przedstawiono na wykresach, rys. 4 i 5.

Tablica 2. Wartości odcięcia cykli o małej amplitudzie

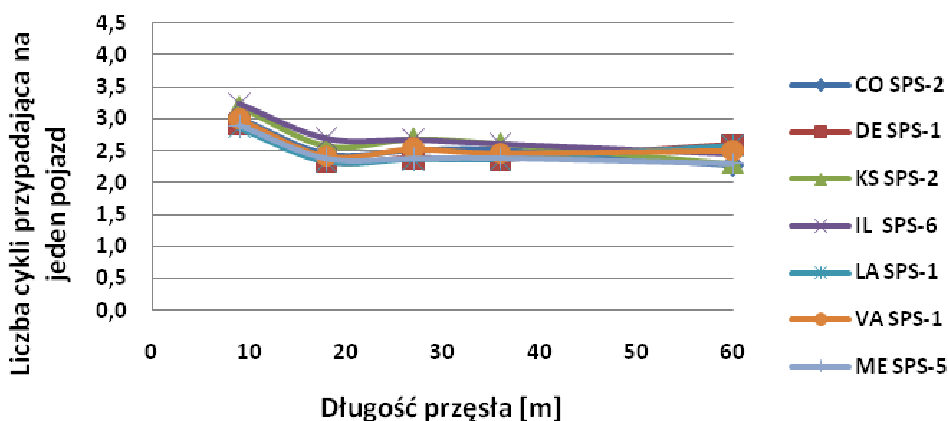
Długość Przęsła [m]	Wartość Amplitudy [kNm]
9	14
18	27
27	41
36	55
60	92

### Most jednoprzęsłowy - środek przęsła



Rys. 4. Liczba cykli przypadająca na jeden pojazd w środku przęsła w mostach jednoprzęsłowych dla rozpiętości przęsła od 9 m do 60 m

### Most dwuprzęsłowy, ciągły - środkowa podpora



Rys. 5. Liczba cykli przypadająca na jeden pojazd nad środkową podporą w mostach dwuprzęsłowych, ciągłych dla rozpiętości przęsła od 9 m do 60 m

Cykle obciążenia o zróżnicowanej amplitudzie są trudne do zinterpretowania i porównania z kryteriami projektowymi. Wzór Miner'a zmienia zróżnicowane amplitudy obciążenia do jednej stałej amplitudy. Wzór ten został skonstruowany w taki sposób, aby równoważna stała amplituda obciążenia cyklicznego powodowała takie samo zmęczenie materiału jak amplituda zróżnicowana dla takiej samej ilości cykli [2].

$$M_{eq} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^n (p_i * m_i^3)} \quad (1)$$

gdzie:

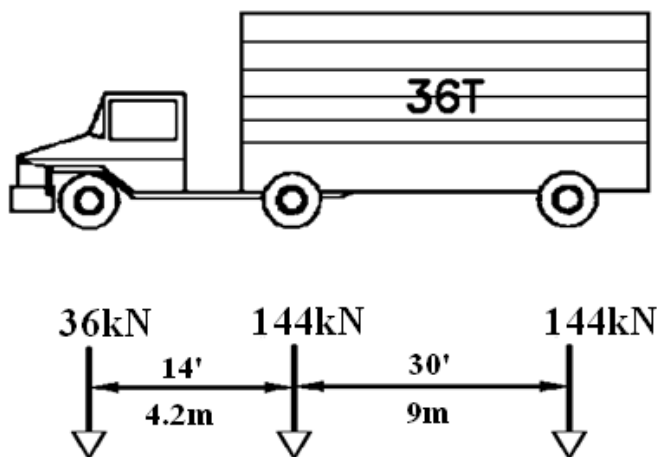
$M_{eq}$  – amplituda momentu równoważnego,

$p_i$  – prawdopodobieństwo wystąpienia w danym interwale  $i$ ,

$m_i$  – średni moment interwału

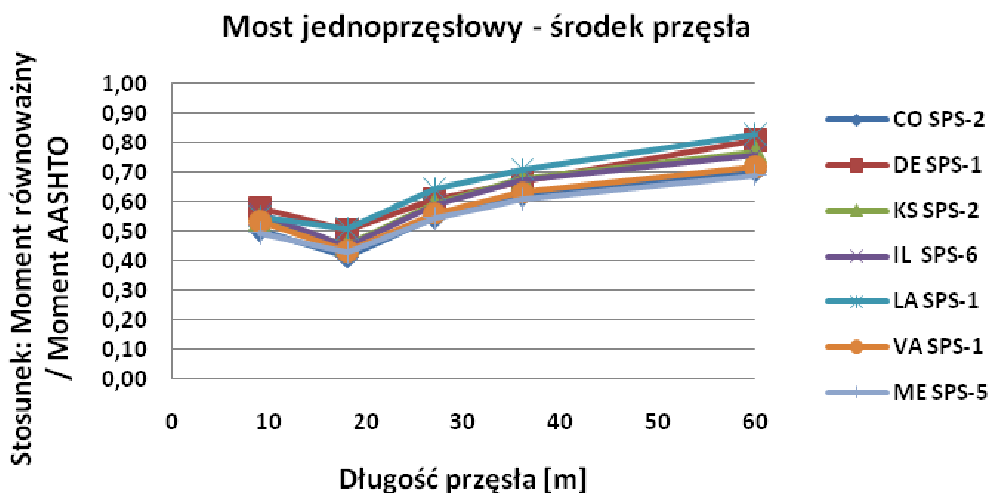
Równoważne amplitudy momentu zostały policzone dla wybranych stacji WIM dla różnych rozpiętości przęseł w przedziale od 9 m do 60 m. Rozpatrywano pozytywny moment zginający w środku przęsła na mostach jednoprzęsłowych i negatywny nad środkową podporą w mostach ciągłych.

Dla ułatwienia porównania rezultatów z obciążeniem projektowym wyniki rzeczywistych momentów podzielono przez moment wywołany ciężarówką projektową z AASHTO LRFD 2007 [1]. Obciążenie projektowe składa się z trzyosiowego pojazdu HS-20 z obciążeniami na osie i odstępami między nimi odpowiednio przedstawionymi na rys. 6.

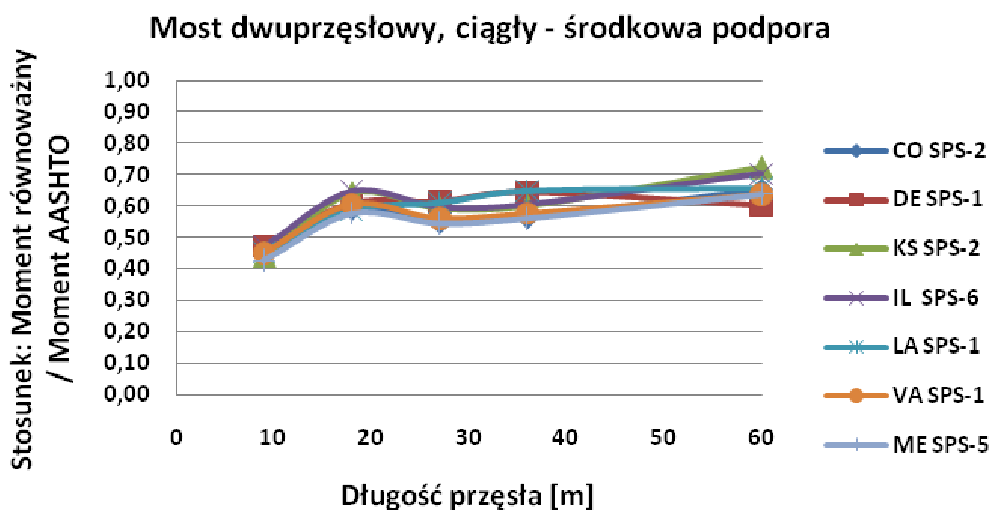


Rys. 6. Ciężarówka projektowa HS-20 [1]

Współczynnik obciążeniowy dla stanu granicznego zmęczenia II wynosi 0,75. Stosunek momentu równoważnego ze stacji WIM i momentu wywołanego przez obciążenie projektowe przekraczające tą wartość oznacza, że rzeczywiste obciążenie zmęczeniowe będzie większe od projektowego. Wyniki przedstawiono na wykresach, rys. 7 i 8.



Rys. 7. Stosunek momentu równoważnego do momentu wywołanego obciążeniem projektowym AASHTO w mostach jednoprzęsłowych dla rozpiętości przęsła od 9 m do 60 m



Rys. 8. Stosunek momentu równoważnego do momentu wywołanego obciążeniem projektowym AASHTO w mostach dwuprzęsłowych dla rozpiętości przęsła od 9 m do 60 m

#### 4. Wnioski

Wyniki analizy pokazały, że największa różnica między wytycznymi normy, a rzeczywistością jest w liczbie cykli obciążeniowych powodowanych przez jeden pojazd na mostach ciągłych. Norma wskazuje, że liczba cykli na jeden pojazd wynosi 1,5 dla przęseł większych od 12 m oraz 2 dla przęseł mniejszych od 12 m. Natomiast analiza rzeczywistego ruchu ciężarówek wykazała, że liczba ta wynosi 2,5 dla przęseł większych od 12 m oraz 3 dla przęseł mniejszych od 12 m. Oznacza to, że w rzeczywistości zmęczenie materiału w mostach ciągłych będzie następowało o 50% szybciej dla przęseł do 12 m i aż o 60% szybciej dla przęseł dłuższych. Ponadto w mostach o długości przęsła 55÷60 m w niektórych

lokalizacjach rzeczywisty moment równoważny przekracza wartość momentu, na który konstrukcja jest projektowana. Taka sytuacja ma miejsce zarówno dla mostów z dźwigarami wolnopodpartymi jak i ciągłymi.

### **Literatura**

1. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C. 2007.
2. Committee on Fatigue and Fracture Reliability of the Committee on Structural Safety and Reliability of the Structural Division.: Fatigue Reliability: Variable Amplitude Loading, Journal of the Structural Division, 1982, ASCE, Vol. 108, No. ST1, Jan. 1979, pp. 186÷90.
3. Matsuishi, M. & Endo, T.: Fatigue of metals subjected to varying stress, Japan Soc. Mech. Engineering, 1968.
4. Downing, S. D., Socie, D. F.: Simple rain-flow counting algorithms. International Journal of Fatigue, Volume 4, Issue 1, January, 31÷40, 1982.