



KAROL BRZEZIŃSKI

Politechnika Warszawska
karol.brze@gmail



prof. dr hab. inż.
ARTUR ZBICIAK

Politechnika Warszawska
a.zbiciak@il.pw.edu.pl

Wpływ historii obciążenia na trwałość zmęczeniową gruntów związanych cementem

Najbardziej uniwersalną grupą metod projektowania nawierzchni drogowych są metody mechanistyczno-empiryczne [10]. Zastosowanie tych metod związane jest z koniecznością wyznaczenia stanu naprężenia i odkształcenia występującego w krytycznych punktach nawierzchni pod wpływem przewidywanego obciążenia [5]. Na tej podstawie, przy zastosowaniu sformułowanych empirycznych

nie związków, szacuje się trwałość zmęczeniową. W metodach mechanistyczno-empirycznych wykorzystywane są dwa podstawowe kryteria. Pierwsze dotyczy spękania na spodzie warstw asfaltowych, w wyniku powtarzalnych obciążeń od kół pojazdów. Drugie kryterium odnosi się do zjawiska powstawania kolein strukturalnych, w wyniku akumulacji nieodwracalnych odkształceń w górnych warstwach podłoża gruntowego. W przypadku nawierzchni półsztywnych proces zniszczenia konstrukcji dzieli się dodatkowo na dwie fazy, przed i po wystąpieniu spękań zmęczeniowych.

Przedmiotem opracowania jest propozycja oceny wpływu historii obciążenia na trwałość zmęczeniową gruntów związanych cementem. Skupiono uwagę na matematycznym opisie metody. Wykorzystano wyniki badań doświadczalnych, które są dostępne w literaturze. Zastosowanie uogólnionego pojęcia jednostkowej szkody zmęczeniowej pozwoliło na sformułowanie prostej w opisie i zastosowaniu hipotezy zmęczeniowej uzależniającej trwałość zmęczeniową od historii obciążenia.

Przyjęte założenia

Określenie liczby obciążeń wywołujących spękania podbudowy ma znaczący wpływ na wyznaczoną ostatecznie trwałość zmęczeniową. Dlatego też powstało wiele kryteriów spękania podbudów związanych spoiwami hydraulicznymi, z których polskie wytyczne wymieniają głównie kryterium zmęczeniowe Uniwersytetu w Illinois, stosowane w metodzie Instytutu Asfaltowego [3] oraz kryterium z metody francuskiej [2].

Liczbę osi obliczeniowych N_k , w pierwszym etapie pracy nawierzchni półsztywnych (do wystąpienia spękań zmęczeniowych podbudowy), obliczamy według kryterium Uniwersytetu Illinois (kryterium Dempsey'a), stosując wzór:

$$\log N_k = 11,784 - 12,121 \left(\frac{\sigma}{R_{zg}} \right) \quad (1)$$

w którym:

- σ – naprężenia rozciągające w warstwie podbudowy związanej spoiwem hydraulicznym,
- R_{zg} – wytrzymałość materiału podbudowy na rozciąganie przy zginaniu.

Kryterium stosowane w metodzie francuskiej opisane jest wzorem:

$$NE = \left\{ \frac{\sigma_{t,ad}}{\sigma_6 \cdot k_r \cdot k_c \cdot k_s \cdot k_d} \right\}^{\frac{1}{b}} \cdot 10^6 \quad (2)$$

w którym:

- $\sigma_{t,ad}$ – poziome naprężenie rozciągające, na spodzie warstw z materiałów związanych spoiwami hydraulicznymi,
- σ_6 – naprężenie rozciągające, przy którym następuje zniszczenie w teście zginania próbek po 360 dniach dojrzewania, po 10^6 cyklach,
- k_d – współczynnik uwzględniający efekt nieciągłości w warstwie podbudowy związanej spoiwem hydraulicznym,
- NE – ilość obciążeń osią standardową,
- k_r – współczynnik ryzyka,
- k_c – współczynnik materiału,
- k_s – współczynnik podłoża.

Ze wzorów 1 i 2 wynika, że w przypadku obydwu kryteriów, podstawowym parametrem jest naprężenie rozciągające powstające w konstrukcji, odniesione do stałej, zdefiniowanej w różny sposób wytrzymałości na rozciąganie. Niezależnie jednak od stosowanych kryteriów, projektując konstrukcję nawierzchni, stosuje się hipotezę liniowej kumulacji uszkodzeń Palmgrena-Minera, która została stworzona dla stopów metali [8].

Hipotezę liniowej kumulacji uszkodzeń Palmgrena-Minera przedstawia równanie (patrz [7]):

$$\sum \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (3)$$

w którym:

- n_i – liczba cykli naprężeń o wartości σ_i ,
- N_i – liczba cykli do zniszczenia przy naprężeniu σ_i ,
- m – liczba poziomów naprężeń σ_i .

Liczne wyniki badań wskazują na istotny wpływ historii obciążenia na trwałość zmęczeniową, czego powyższa hipoteza nie uwzględnia. Zjawisko to zaobserwowano zarówno

w przypadku metali [10], betonów [6], jak i gruntów związanych cementem [4].

Wyniki badań zamieszczone w opracowaniu H. Koby [4], które dotyczą podbudów związanych cementem, obrazują jak duże znaczenie może mieć kolejność zadanych obciążeń. Według [4], próbki poddane wstępnym obciążeniom wykazywały trwałość o wiele większą, niż wynikałoby to z powszechnie stosowanej hipotezy Palmgren-Minera. Ponadto, autor monografii [4] zauważa, że próbki, które nie uległy zniszczeniu w wyniku obciążeń cyklicznych, wykazują wzrost wytrzymałości doraźnej (statycznej) w stosunku do próbek porównawczych.

Połączenie tych obserwacji pozwoliło autorom niniejszego artykułu na przyjęcie dwóch założeń, których rozwinięcie prowadzi do zarysu metody wyznaczania trwałości zmęczeniowej uwzględniającej wpływ historii obciążenia.

Założenie 1. Wytrzymałość doraźna (styczna) materiału może zwiększać się w wyniku poddania go działaniu obciążeń cyklicznych.

Zjawisko wzrostu wytrzymałości doraźnej gruntów związanych, wywołane obciążeniami cyklicznymi, nie jest wyczerpująco opisane w literaturze. W niniejszej pracy przyjęto uproszczoną funkcję przyrostu doraźnej wytrzymałości na podstawie pośrednich obserwacji.

Założenie 2. Konstrukcja pod wpływem jednego cyklu obciążenia doznaje jednostkowej szkody trwałości zmęczeniowej, zależnej od doraźnego stopnia wyężenia konstrukcji, gdzie doraźny stopień wyężenia oznacza stosunek zadanego obciążenia do wytrzymałości doraźnej.

Należy zwrócić uwagę na konsekwencję przyjętych założeń, polegającą na tym, że w związku ze wzrostem wytrzymałości doraźnej, przy stałym obciążeniu, szkoda narastać będzie niejednostajnie, ponieważ stopień wyężenia próbki maleje. Jest to zasadnicza różnica pomiędzy zaproponowaną metodą a podejściem klasycznym (np. wg kryterium Illinois), gdzie zakłada się jednakowy przyrost szkody zmęczeniowej w całym procesie zniszczenia.

Opis metody

Zjawisko przyrostu doraźnej wytrzymałości materiału na skutek cyklicznego obciążenia (tzw. zjawisko trenowania lub zaprawy) zaobserwowane przez H. Kobę [4], było już wcześniej opisywane, głównie w odniesieniu do metali. Pojawiają się również prace podkreślające wpływ tego zjawiska na trwałość zmęczeniową [9], jednak autorom nie udało się znaleźć hipotezy pozwalającej ująć to zagadnienie w sposób ilościowy. Dlatego też propozycję autorskiego podejścia przedstawiono w niniejszego artykule.

W celu wyjaśnienia przedstawionych we wstępie założeń zdefiniowano w następujący sposób kluczowe dla hipotezy pojęcia:

R_d – wytrzymałość doraźna – największe obciążenie, jakie jest w stanie przenieść materiał w statycznej próbie wytrzymałościowej (na potrzeby niniejszych rozważań nie określa się rodzaju próby wytrzymałościowej ani jednostek wytrzymałości),

R_n – nominalna wytrzymałość doraźna – jest to wytrzymałość doraźna próbki przed wzmocnieniem wskutek cyklicznego obciążenia,

S_n – nominalny stopień wyężenia, stosunek obciążenia działającego na próbkę do jej wytrzymałości nominalnej R_n ,

S_d – doraźny stopień wyężenia, stosunek obciążenia działającego na próbkę do jej wytrzymałości doraźnej R_d ,

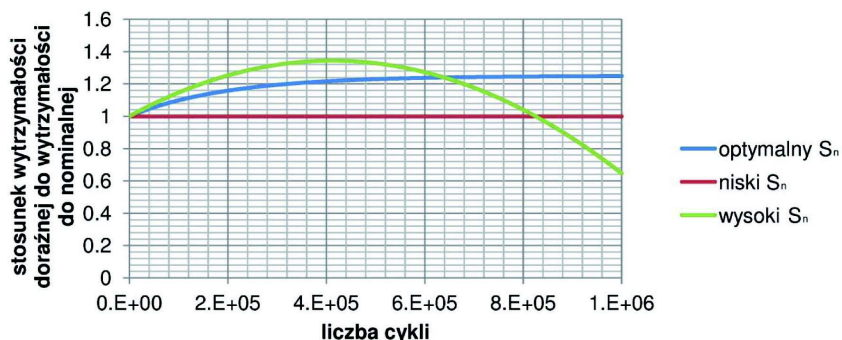
d – jednostkowa szkoda trwałości zmęczeniowej – wartość szkody zmęczeniowej, jakiej doznaje próbka w skutek jednego cyklu obciążenia. W odniesieniu do hipotezy Palmgren-Minera, bez uwzględnienia przyrostu wytrzymałości doraźnej, szkoda jednostkowa będzie wartością stałą wynoszącą $d = \frac{1}{N}$, w której:

N – trwałość zmęczeniowa – liczba cykli obciążeń zmęczeniowych wywołujących zniszczenie próbki.

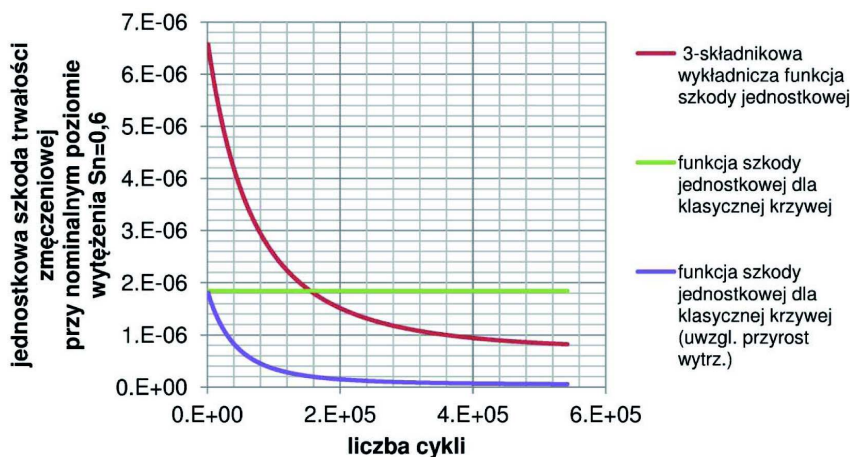
Wprowadzone wcześniej założenie 1, odnosi się do wytrzymałości doraźnej materiału. Zaobserwowano, że w zależności od stopnia wyężenia, wytrzymałość doraźna może zmieniać się w różny sposób [9]. Zostało to zilustrowane na rysunku 1, którego ideę zaczerpnięto z [9], wprowadzając własne oznaczenia.

Łatwo zauważyć, że niski stopień wyężenia pozostaje bez wpływu na wytrzymałość doraźną (niski S_n na rys. 1). Stopień wyężenia, opisany jako optymalny, powoduje stopniowy przyrost wytrzymałości do pewnego stałego poziomu. Natomiast wysokie wyężenie materiału powoduje początkowo duże wzmocnienie, a w kolejnej fazie następuje degradacja wytrzymałości doraźnej. Warto zauważyć, że w trzecim przypadku, można podjąć próbę prognozy wytrzymałości zmęczeniowej, na podstawie samego równania krzywej. W takim przypadku, przy stałym poziomie obciążenia, zniszczenie powinno nastąpić wtedy, gdy wytrzymałość doraźna materiału spadnie do wartości zadanego obciążenia. Warto podkreślić, że zastosowanie tego podejścia wymagałoby przeprowadzenia zdecydowanie większej liczby badań, niż w przypadku metody będącej głównym przedmiotem pracy omawianej w niniejszym artykule.

W naszej pracy założyliśmy, że przyrost wytrzymałości doraźnej mieszanek związanych cementem zależy wyłącznie od liczby cykli, natomiast charakter wzmocnienia odpowiada optymalnemu stopniowi wyężenia. Założenie 2 wprowadza niewielką, aczkolwiek istotną modyfikację do stosowanej dotychczas metody. Zwykle trwałość zmęczeniowa



Rys. 1. Przebieg zmiany wytrzymałości w zależności od nominalnego stopnia wyężenia (por. [7])



Rys. 2. Zmiana jednostkowej szkody zmęczeniowej w procesie cyklicznego obciążenia

niową określa się jako funkcję nominalnego stopnia wyężenia S_n , przyjmując, że przy stałej wartości obciążenia nie ulega on zmianie. Uwzględniając jednak założenie 1, dotyczące wzmocnienia materiału, w naturalny sposób zachodzi potrzeba zastosowania formuły zawierającej doraźny stopień wyężenia S_d . Trwałość zmęczeniowa jest ostatecznym wynikiem, w którym skumulowana szkoda zmęczeniowa osiąga wartość jednostkową. Dlatego też, w celu opisanego przebiegu zjawiska zmęczenia materiału, pozwalającego na uwzględnienie powyższych założeń, wykorzystano pojęcie jednostkowej szkody trwałości zmęczeniowej.

Analizując przebieg krzywych na rysunku 2, widzimy, że w przypadku klasycznej metody, nie ma konieczności analizowania szkody jednostkowej, ponieważ przy stałym nominalnym poziomie wyężenia, nie ulega ona zmianie podczas obciążenia. Oczywiście, nie można uwzględnić wzmocnienia materiału stosując skalibrowane wcześniej, w sposób klasyczny, krzywe zmęczeniowe. Będzie to prowadziło do zaniżenia wartości funkcji jednostkowej szkody zmęczeniowej, a co za tym idzie obliczonej szkody zmęczeniowej. Należy zatem, przyjmując wymienione wcześniej założenia, skalibrować nową krzywą lub bezpośrednio zaproponować funkcję opisującą jednostkową szkodę zmęczeniową. Wówczas całkowitą szkodę zmęczeniową można będzie wyznaczyć jako sumę skumulowaną lub całkę z funkcji szkody jednostkowej. Jak pokaże przykład obliczeniowy, podejście to pozwoli uwzględnić historię obciążenia, co w istotny sposób wpłynie na poprawę oszacowania trwałości.

Kalibracja przykładowej krzywej

Przed przystąpieniem do zweryfikowania potencjalnej przydatności metody poprzez przykład obliczeniowy, należy skalibrować odpowiednią funkcję opisującą zależność jednostkowej szkody trwałości zmęczeniowej od doraźnego poziomu wyężenia. Badania przeprowadzone przez H. Kobę [4] na próbkach piasku pylastego związanego cementem, przy różnych poziomach obciążenia, pozwoliły na ustalenie następującej krzywej zmęczenia (zwanej dalej krzywą doświadczalną):

$$\log N = 13,7801 - 13,4102 \cdot S_n \quad (4)$$

Zatem równanie jednostkowej szkody trwałości zmęczeniowej w przypadku powyższej krzywej wyniesie:

$$d_1 = \frac{1}{10^{13,7801 - 13,4102 \cdot S_n}} \quad (5)$$

Podobnie, w przypadku kryterium Illinois szkoda jednostkowa będzie następująca:

$$d_2 = \frac{1}{10^{11,784 - 12,121 \cdot S_n}} \quad (6)$$

Ponieważ kryterium Illinois oraz krzywa doświadczalna z założenia nie uwzględniają przyrostu wytrzymałości doraźnej, doraźny stopień wyężenia przy stałym poziomie obciążenia nie ulega zmianie i jest równy nominalnemu stopniowi wyężenia.

Właściwe funkcje jednostkowej szkody trwałości zmęczeniowej, w odniesieniu do przedstawianej metody, zaproponowano w postaci krzywych wykładniczych:

$$d_3 = k_1 \cdot S_d^\alpha + k_2 \cdot S_d^\beta + k_3 \cdot S_d^\gamma \quad (7)$$

$$d_4 = k_1 \cdot S_d^\alpha + k_2 \cdot S_d^\beta \quad (8)$$

w których przyrost wytrzymałości opisuje uproszczone równanie zależne wyłącznie od liczby cykli obciążeń i :

$$\frac{R_d}{R_n} = \frac{S_n}{S_d} = 1 + 0,25 \cdot \left(1 - e^{-\frac{i}{200000}}\right) \quad (9)$$

Powyższa formuła odpowiada wcześniej omówionemu przypadkowi wzmocnienia materiału przy optymalnym stopniu wyężenia.

W wyniku procedury kalibracji otrzymano parametry poszukiwanych funkcji szkody jednostkowej, przedstawione w tabeli 1.

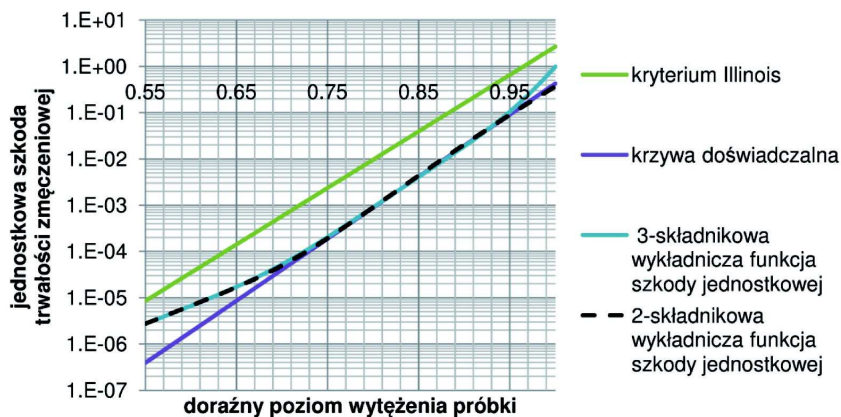
Tabela 1. Wyznaczone parametry zaproponowanych funkcji jednostkowej szkody trwałości zmęczeniowej.

parametr	α	β	γ	k_1	k_2	k_3
d_3	25,8460	9,6554	58,5203	0,2557	0,00086	0,7334
d_4	27,5064	9,9168	–	0,3661	0,001	–

Wyznaczone funkcje zobrazowano na rysunku 3.

Najistotniejszą cechą wspólną skalibrowanych wykładniczych funkcji jest to, że znacznie odbiegają od jednostkowej szkody trwałości zmęczeniowej wyznaczonej na podstawie krzywej doświadczalnej przy niskim doraźnym stopniu wyężenia. Dzieje się tak dlatego, ponieważ dopiero przy dużej liczbie obciążeń następuje wzmocnienie materiału. Zjawisko to zmniejsza doraźny stopień wyężenia. Skoro jednak docelowa trwałość jest niezmienna, niezależnie od metody (wyniki badań), to w efekcie jednostkowa szkoda przy niskim poziomie wyężenia musi być większa.

Spośród funkcji przedstawionych na rysunku 3, tylko jedna osiąga wartość 1,0 przy jednostkowym, doraźnym poziomie wyężenia. Na podstawie analizy pozostałych funkcji można



Rys. 3. Zależność wybranych funkcji jednostkowej szkody trwałości zmęczeniowej od doraźnego poziomu wyętnienia

wyciągnąć wniosek, sprzeczny z definicją doraźnej wytrzymałości, że zniszczenie przy jednorazowym obciążeniu następuje przy obciążeniu większym lub mniejszym niż wytrzymałość doraźna. Przykładowo, z formuły kryterium Illinois wynika, że zniszczenie następuje przy obciążeniu wynoszącym 97% wytrzymałości. Zaburzenie to spowodowane jest zupełnie innym charakterem zmęczenia materiału przy dużym stopniu wyętnienia, gdzie dominujące są efekty związane z plastycznością materiału [10]. W przypadku podbudów związanych, badania nastawione są na wyznaczenie trwałości wynoszącej co najmniej kilkadziesiąt tysięcy cykli. Dlatego też rozciąganie takich wyników na zakres trwałości przy małej liczbie cykli może wiązać się z dużym błędem.

Na podstawie porównania wyników trwałości zmęczeniowej N , policzonej z zastosowaniem krzywej doświadczalnej i zaproponowanych funkcji uszczerbku jednostkowej szkody trwałości zmęczeniowej, kalibrację można ocenić jako dobrą, w przypadku obciążenia o stałym nominalnym stopniu obciążenia.

Podkreślamy, że istotą zaproponowanej metody nie jest wyłącznie dopasowanie wyników przy stałym poziomie obciążenia, a uwzględnienie historii zmiennych obciążeń. Dlatego wyżej skalibrowane funkcje zostaną zastosowane w przykładzie obliczeniowym, w którym wyniki badań drastycznie różniły się od prognozy trwałości z zastosowaniem hipotezy Palmgerna-Minera.

Tabela 2. Porównanie trwałości zmęczeniowej wyznaczonej na podstawie krzywej doświadczalnej i zaproponowanych funkcji jednostkowej szkody trwałości zmęczeniowej

S_n	N [9]	$N(d_3)$	$N(d_4)$
0,55	2 537 990	2 620 320	2 484 285
0,60	541 976	515 959	505 306
0,65	115 736	121 749	119 423
0,70	24 711	25 430	23 810
0,75	5 277	5 324	4 983
0,80	1 127	1 125	1 123
0,85	240	233	252
0,90	51	48	53
0,95	10	10	9

Przykład obliczeniowy

W pracy [4] przeanalizowano wpływ obciążeń cyklicznych o zmiennej w czasie amplitudzie obciążenia (wynikającej z rzeczywistych rozkładów nacisków na nawierzchnie drogowe), na podstawie wyników badań gruntu stabilizowanego w warunkach obciążeń programowych. Próbki poddane były wstępnym obciążeniom przez okres 28 dni. Dobowy cykl obciążenia wstępnego przedstawia tabela 3, szczegółowy opis badania znajduje się w monografii [4].

Po wstępnym obciążeniu, próbki poddawano rosnącym obciążeniom po 500 cykli, na kolejnych poziomach obciążeń nominalnych zwiększanych co $0,05R_n$.

Tabela 3. Program dobowego cyklu obciążenia wstępnego

Poziom naprężeń S_n	Liczba cykli obciążeń i
0,55	20250
0,60	6000
0,65	2000
0,70	1000
0,75	500
0,55	20250

Efekt wytrenowania materiału okazał się zaskakujący, próbka uległa zniszczeniu dopiero po 283 cyklach na nominalnym poziomie obciążenia wynoszącym $S_n = 1,15$. Przy takim wzmocnieniu nie ma możliwości oszacowania szkody zmęczeniowej z zastosowaniem hipotezy Palmgerna-Minera. Dlatego też porównanie wyników przedstawiono do momentu, w którym nominalny poziom obciążenia wyniósł $S_n = 0,95$, a policzona szkoda zmęczeniowa $D_1 = 62$.

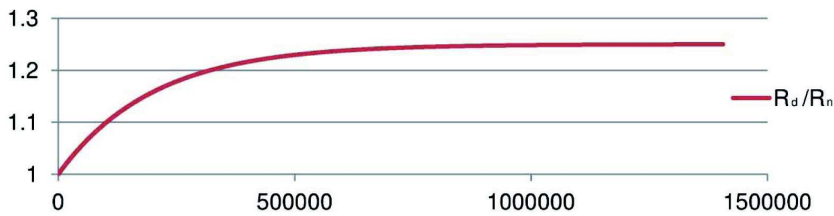
Obliczenia przeprowadzono z zastosowaniem ww. funkcji jednostkowej szkody trwałości zmęczeniowej (patrz wzory 7 i 8), a całkowitą szkodę zmęczeniową wyznaczono ze wzoru:

$$D_j = \sum_{i=1}^N d_j \cdot (S_{d_i}) \quad (10)$$

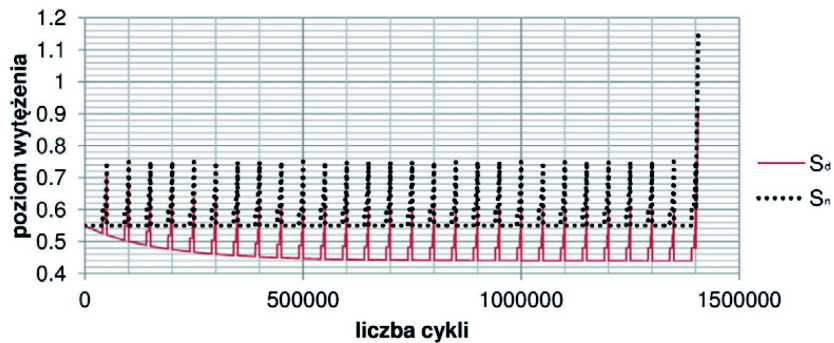
Aby lepiej zilustrować opis przebiegu zjawiska zmęczenia materiału z uwzględnieniem efektu wzmocnienia, na kolejnych rysunkach przedstawiono: przyrost wytrzymałości doraźnej materiału (rys. 4), porównanie nominalnego i doraźnego stopnia obciążenia (rys. 5), porównanie funkcji jednostkowej szkody trwałości zmęczeniowej w początkowej i końcowej fazie obciążenia (rys. 6 i 7) oraz porównanie przebiegu przyrostu szkody zmęczeniowej (rys. 8).

Zestawienie wykresów przedstawionych na rysunkach 4 i 5 obrazuje wpływ przyrostu wytrzymałości doraźnej materiału na doraźny stopień wyętnienia materiału.

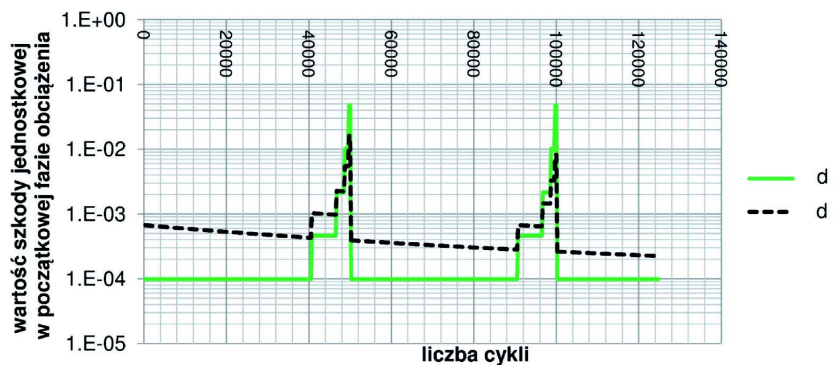
Wykresy przedstawione na rysunku 6 wskazują, że zaproponowana funkcja jednostkowej szkody trwałości zmęczeniowej jest mniej wrażliwa na nominalny stopień wyętnienia. Stosunek wartości opisanego szkody jednostkowej opisanego wzorem (5) w pierwszym dobowym cyklu obciążenia zmienia się w prze-



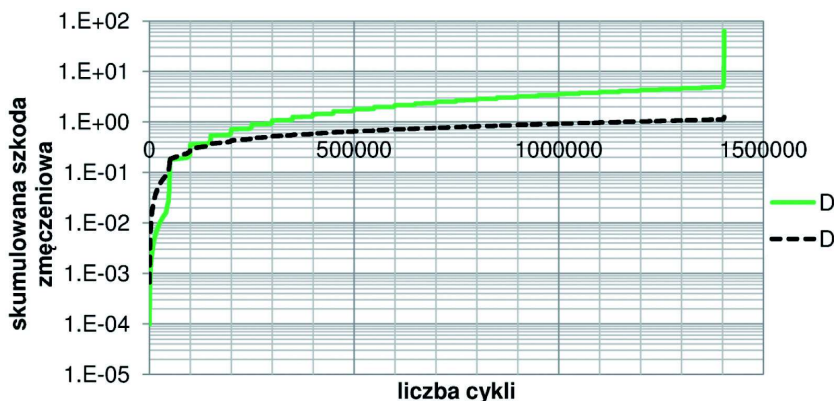
Rys. 4. Wykres założonej funkcji przyrostu wytrzymałości doraźnej R_d



Rys. 5. Porównanie nominalnego i doraźnego poziomu wyężenia



Rys. 6. Porównanie wartości funkcji jednostkowej szkody trwałości zmęczeniowej w początkowej fazie obciążenia, w której d_1 – szkoda jednostkowa wg wzoru 5, d_4 – szkoda jednostkowa wg wzoru 8



Rys. 7. Porównanie wartości funkcji jednostkowej szkody trwałości zmęczeniowej w końcowej fazie obciążeniowej, w której d_1 – szkoda jednostkowa wg wzoru 5, d_4 – szkoda jednostkowa wg wzoru 8

dziale od wartości $d_1 = 0,0001$, przy $S_n = 0,5$ do $d_1 = 0,0474$, przy $S_n = 0,75$. Natomiast przy tym samym obciążeniu wartości szkody jednostkowej wg wzoru 8 wynoszą odpowiednio $d_4 = 0,0004$, przy $S_n = 0,55$ do $d_4 = 0,0161$, przy $S_n = 0,75$.

Z rysunku 7 wynika, że w końcowej fazie obciążenia przyrost wytrzymałości powoduje, że uszkodzenia, których doznaje wytrenowany materiał, są o wiele mniejsze.

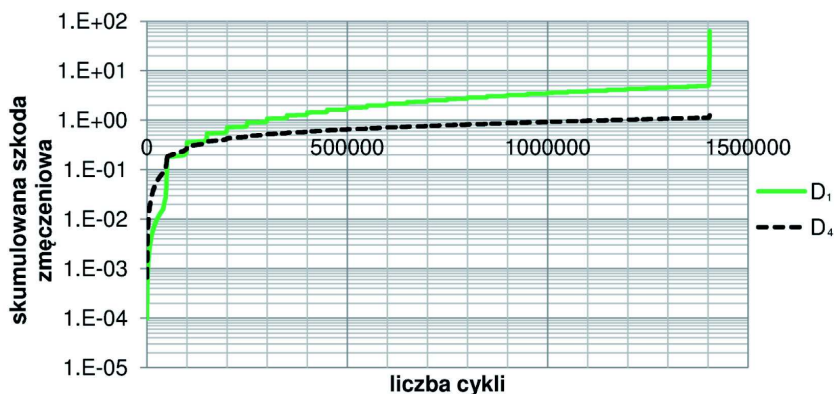
Ostatecznie, skumulowana szkoda zmęczeniowa, policzona do poziomu wyężenia $S_n = 0,95$, dla czwartej funkcji jednostkowej szkody trwałości zmęczeniowej, wyniosła $D_4 = 1,332$, podczas gdy dla funkcji nie uwzględniającej zmiany wytrzymałości otrzymano $D_1 = 62,95$.

Wyniki uzyskane z zastosowaniem zaproponowanej metody dużo lepiej wpisują się w podstawowe założenia hipotez zmęczeniowych, w których zniszczenie następuje przy szkodzie wynoszącej ok. 1. Należy jednak pamiętać, że kalibracji dokonano na podstawie ograniczonego zakresu badań, pośrednio wyciągając wnioski dotyczące zmian wytrzymałości doraźnej. Zweryfikowanie poprawności i przydatności metody wymaga jeszcze przeprowadzenia wielu eksperymentów, dotyczących zwłaszcza wpływu obciążeń cyklicznych na właściwości konstytutywne materiału. Dalsze prace autorów niniejszego opracowania będą koncentrowały się na zagadnieniach weryfikacji eksperymentalnej zaproponowanej metody.

Wnioski

Przeprowadzona w niniejszym artykule analiza umożliwiła wyciągnąć następujące wnioski:

1. Zaproponowana metoda pozwala wyjaśnić wpływ historii obciążenia na uzyskaną trwałość zmęczeniową.
2. Bardzo ważna, w odniesieniu do przedstawionej metody, jest znajomość przebiegu zmiany wytrzymałości doraźnej w procesie cyklicznego obciążenia. Nie jest to dobrze rozpoznane zjawisko, zwłaszcza w przypadku gruntów związanych cementem. Dlatego wymaga przeprowadzenia kompleksowych badań.
3. Struktura rodzajowa ruchu może wpłynąć na trwałość nawierzchni. Dla tej samej liczby osi obliczeniowych, przy różnej strukturze rodzajowej bądź historii obciążenia uzyskana trwałość może być inna.
4. Niniejsza metoda może być zastosowana również do innych materiałów, które wykazują zmianę wytrzymałości doraźnej w wyniku cyklicznych obciążeń.



Rys. 8. Wykres przyrostu całkowitej szkody zmęczeniowej uwzględniający (D_1) i nie uwzględniający (D_2) przyrostu wytrzymałości doraźnej pod wpływem obciążenia cyklicznego

Bibliografia

- [1] G. Gasiak, *Trwałość materiałów konstrukcyjnych przy obciążeniach cyklicznych z udziałem wartości średniej obciążenia*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2002
- [2] J. Judycki (red.), *Analizy i projektowanie konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2014
- [3] Katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych. IBDiM, GDDP, Warszawa 1997
- [4] H. Koba, *Trwałość nawierzchni drogowych o podbudowach związanych cementem*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000
- [5] R. Michalczyk, A. Zbiciak, *Wyznaczenie stanów naprężeń i odkształceń w mechanistycznym projektowaniu nawierzchni podatnych*. Theoretical Foundations of Civil Engineering, Vol. 19, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2011, s. 173–178
- [6] Oh B. H., Cumulative Damage Theory of Concrete under Variable-Amplitude Fatigue Loadings. American Concrete Institute Materials Journal, January-February 1991, s. 41–48
- [7] R. Pyrz, A. Tylikowski, *Wytrzymałość materiałów*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1983
- [8] W. Schütz, *A History of Fatigue*. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 54, No. 2, Otobrun 1996, s. 263–300
- [9] L. Xi, Z. Songlin, *Strengthening and damaging under low-amplitude loads below the fatigue limit*, International Journal of Fatigue 31, 2009, s. 341–345
- [10] A. Zbiciak, K. Brzeziński, *Porównanie procedur projektowania nawierzchni podatnych i półsztywnych na podstawie starego i nowego polskiego katalogu typowych konstrukcji* [w:] Teoretyczne podstawy budownictwa. Tom III Konstrukcje inżynierskie, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2013, s. 103–114



SŁAWOMIR KARASZ

Politechnika Lubelska
s.karas@pollub.pl

Przyczynek do dyskusji nad Eurokodami

Treści Eurokodów można dyskutować w różnych aspektach. W artykule przyjęto jako podstawowy, najbardziej ogólny punkt odniesienia, tj. przez mechanikę konstrukcji. Z racji

zainteresowań autora artykułu, ale również z racji profilu miesięcznika *Drogownictwo*, dyskutowane będą normy mostowe, w szczególności podstawowa norma przy projektowaniu mostów, tj. PN-EN 1991-2 [31]. Dyskusja tylko nad zagadnieniami mostowymi nie zmniejsza ogólności rozważań, gdyż jest także w relacji do materiałów konstrukcyjnych, co odpowiada układowi Eurokodów:

- Eurokod 2 – konstrukcje betonowe – mosty betonowe – PN-EN 1992-2 [32],
- Eurokod 3 – konstrukcje stalowe – mosty stalowe – PN-EN 1993-2 [33],
- Eurokod 4 – konstrukcje zespolone – mosty zespolone – PN-EN 1994-2 [34].

Problematyka Eurokodów już po ich wprowadzeniu w 2010 r. była także przedmiotem wielu artykułów. W pracach [5], [20] podjęto próbę szacowania odpowiednika klas obciążeń mostowych, drogowych oraz przydatności Eurokodów jako zbioru norm do projektowania. M. Łagoda [13-15] wspólnie z G. Łagodą [12] przedstawili opisy struktury norm i nowych ujęć projektowania, a w szczególności wprowadze-

nie w sposób wydzielony od innych norm projektowanie mostów zespolonych typu stal-beton [34]. Podobną informacyjną formę mają publikacje B. Lewickiego [11]. H. Zobel i D. Sobala [26] postulowali uzupełnienie Eurokodu [31]. Analizie współczynników dynamicznych mostów kolejowych jest poświęcona publikacja [7], w której zwrócono uwagę na pominięcie w normie [31] przepustów kolejowych.

Eurokody zawierają wiele nowych obszarów analizy konstrukcji mostowych, co jest widoczne przy zestawieniu z wcześniejszymi polskimi normami mostowymi [28, 29]. Jeśli ich ponowna redakcja ma wnieść nowe korzyści, trzeba je poddać krytycznej analizie. Najważniejszym punktem odniesienia jest pozycja projektantów, gdyż do nich jest adresowany ten zestaw dokumentów normowych. Równie ważne jest umiejscowienie normy czy grupy norm w relacjach do innych dokumentów technicznych tej i innej rangi.

Dyskusję nad Eurokodami warto rozpocząć od wprowadzonego hasłowo terminu *shear lag*.

Zagadnienie *shear lag*

Pojęcie *shear lag* jest jednym z podstawowych zagadnień mechaniki. Zagadnienie to nie jest jednak dostatecznie rozpowszechnione i klarownie przedstawione w dziedzinie wie-