



ARTUR ZBICIAK¹⁾
 MIROSŁAW GRACZYK²⁾
 KAZIMIERZ JÓZEFIAK³⁾
 KAROL BRZEZIŃSKI⁴⁾
 RAFAŁ MICHALCZYK⁵⁾

ASSESSMENT OF THE EFFECT OF CONCRETE SLAB GEOMETRICAL PARAMETERS ON THE DISTRIBUTION OF STRESSES IN THE ROAD PAVEMENT STRUCTURE

OCENA WPŁYWU PARAMETRÓW GEOMETRYCZNYCH PŁYTY BETONOWEJ NA ROZKŁAD NAPRĘŻEŃ W KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI DROGOWEJ

STRESZCZENIE. Przedmiotem artykułu jest analiza stanu naprężenia w płycie betonowej wykonanej na istniejącej konstrukcji nawierzchni podatnej (ang. *whitotopping*). Nakładkę zaprojektowano na użytkowanym pakiecie warstw konstrukcyjnych o znanej sztywności. Przeanalizowano wpływ obciążeń od gradientu temperatury oraz obciążeń od kół pojazdów. Obliczenia wykonano z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Analizie poddano kilka wariantów nałożonej cienkiej nakładki betonowej whitotopping o zróżnicowanej geometrii ustroju. Zmiana długości płyty może prowadzić do zmniejszenia kosztów wykonania nawierzchni. Większa długość płyty powoduje mniejszą liczbę szczelin poprzecznych na kilometr, a co za tym idzie mniejszą pracochłonność i zużycie dybli. Zwiększenie długości elementu konstrukcyjnego wiąże się ze wzrostem maksymalnych naprężeń od obciążeń termicznych i eksploatacyjnych, co z kolei może wymuszać zwiększenie grubości płyty w celu zapewnienia odpowiedniej trwałości zmęczeniowej. Przyjęta metoda analizy umożliwi optymalizację kosztów remontu nawierzchni betonowych. Ze względu na złożoność zagadnienia, znalezienie rozwiązania optymalnego wymaga indywidualnego podejścia do zadanych warunków projektowych.

SŁOWA KLUCZOWE: analiza MES, diagnostyka FWD, nakładka betonowa, nawierzchnie betonowe, optymalizacja kosztów.

ABSTRACT. The analysis of the state of stress prevailing in a concrete overlay slab made on an existing flexible pavement structure is presented. The concrete overlay (whitotopping) was made on the using laid over a package of pavement layers of known stiffness. The effect of loads generated by the temperature gradient and vehicle wheels loads was examined. Several whitotopping variants differing in the structural geometry were analysed. The calculations were carried out using the finite element method. A change in the length of slab can lead to a reduction in pavement building costs. A greater slab length results in a smaller number of transverse joints per kilometre and consequently, in lower labour intensity and fewer dowels used. But the maximum stresses generated by thermal and service loads increase as the length of this structural component is increased. Therefore it may be necessary to increase the thickness of the slab to ensure its proper fatigue life. Using the proposed analytical method one can optimize concrete pavement rehabilitation costs. Because of the complexity of the problem an individual approach to the particular cases must be adopted in order to find an optimal solution.

KEYWORDS: FEM analysis, FWD diagnostics, whitotopping, concrete pavements, cost optimization.

¹⁾ Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut Dróg i Mostów; a.zbiciak@il.pw.edu.pl

²⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 03-302 Warszawa; mgraczyk@ibdim.edu.pl

³⁾ Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut Dróg i Mostów, al. Armii Ludowej 16, 00-637 Warszawa; k.jozefiak@il.pw.edu.pl

⁴⁾ Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut Dróg i Mostów; k.brzezinski@il.pw.edu.pl (✉)

⁵⁾ Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut Dróg i Mostów; r.michalczyk@il.pw.edu.pl

1. WSTĘP

Technologia nawierzchni betonowych jest coraz częściej stosowana w Polsce, co znajduje odzwierciedlenie w zwiększającym się udziale dróg o takiej konstrukcji. W szczególności dotyczy to autostrad i dróg ekspresowych, które są poddawane największym obciążeniom eksploatacyjnym. Do niedawna projektowanie konstrukcji nawierzchni dróg najwyższych klas wymagało indywidualnego podejścia opartego zwykle na stosowaniu metod mechanistyczno-empirycznych. Obecne przepisy [1] dopuszczają już projektowanie nowych konstrukcji nawierzchni wszystkich klas metodą katalogową [2, 3]. Jak sama nazwa wskazuje, katalogi typowych konstrukcji nawierzchni znajdują zastosowanie w standardowych (normalnych) warunkach. Natomiast nawierzchnie przebudowywanych dróg powinny być projektowane indywidualnie. Nie wyklucza to wspomaganie katalogami typowych rozwiązań [4], jednak w przypadku realizacji kosztownych inwestycji - o wysokim stopniu trudności wykonania - zawsze wymagane jest indywidualne podejście. Jest ono niezbędne, zarówno ze względu na osiągnięcie odpowiedniej niezawodności konstrukcji, jak i możliwości optymalizacji jej kosztów.

Przedstawiona w niniejszym artykule technologia whitetopping wymaga zastosowania diagnostyki wysokiej jakości oraz obliczeń mechanistycznych i zmęczeniowych. Technologia ta jest stosowana na świecie od lat osiemdziesiątych ubiegłego wieku [5]. Polega na ułożeniu warstwy betonowej na istniejącej konstrukcji nawierzchni podatnej, co pozwala na oszczędzenie znacznego nakładu pracy i materiałów w stosunku do wykonania nowej nawierzchni. Konstrukcja podatna, której użytkowanie stało się niemożliwe ze względu na utratę cech eksploatacyjnych ma zwykle i tak większą nośność niż typowa podbudowa. Dlatego jej wykorzystanie pozwala zrezygnować z pracochłonnej rozbiórki i wykonania kosztownej podbudowy oraz umożliwia zmniejszenie grubości górnych warstw konstrukcyjnych. Zaprojektowanie wzmocnienia jest jednak trudniejsze niż zaprojektowanie typowej konstrukcji. Jednym z głównych zadań diagnostycznych jest rozpoznanie właściwości istniejącej konstrukcji nawierzchni i jej podłoża [6]. Rozpoznanie układu warstw wymaga wykonania odwiertów, najlepiej wspomaganymi ciągłymi badaniami georadarem, w celu wyznaczenia grubości warstw na odcinkach drogi pomiędzy odwiertami [7].

Następnym ważnym elementem jest identyfikacja sztywności poszczególnych warstw, na przykład z wykorzystaniem badania FWD. Na tej podstawie wykonywane są obliczenia mechanistyczne. Wyznaczany jest stan naprężenia od nacisków kół w różnej konfiguracji oraz od obciążenia gradientem temperatury. Potem wyznaczana jest trwałość zmęczeniowa nawierzchni na podstawie wzorów empirycznych.

1. INTRODUCTION

The concrete pavement technology has been increasingly used in Poland, which is reflected in the rising percentage of roads of this type. This particularly applies to motorways and expressways subjected to the heaviest service loads. Until recently the design of high-class road pavement structures has required an individual approach, usually involving the use of mechanistic-empirical methods. The current regulations [1] allow the use of catalogue methods to design new pavement structures of all classes [2, 3]. As implied above, catalogues of typical road pavement structures can be used to design pavements for new roads, whereas pavements for reconstructed roads should be individually designed. But this does mean that the design cannot be aided with such catalogues in typical cases [4]. However, in the case of cost-intensive and difficult-to-execute projects, an individual approach is always required in order to achieve the proper structural reliability and to optimize the costs.

The whitetopping technology presented in the paper requires the use of high-quality diagnostics, and mechanistic as well as fatigue calculations. This technology has been used in the world since the 1980s [5]. It consists in placing a concrete layer on the existing flexible pavement structure, whereby considerable labour and material savings, in comparison with the building of a new pavement, can be made. The load-bearing capacity of a flexible pavement structure which no longer can be used due to the loss its functional properties is usually still greater than that of a typical road foundation. Therefore the reuse of such a pavement structure eliminates the labour-intensive expensive replacement of a roadbase as well as makes it possible to reduce the thickness of the upper pavement layers. However, it is more difficult to design the structural reinforcement than a typical pavement structure. One of the principal diagnostic tasks is to identify the properties of the existing pavement structure and its sub-grade [6]. In order to find out what the pavement configuration is one must drill cores, determine the thickness of the pavement layers between the drill holes and preferably carry out georadar investigations [7].

Then the stiffness of the particular layers is identified using, e.g. a falling weight deflectometer (FWD). This provides the basis for mechanistic calculations. The state of stress generated by wheel loads in various configurations and by the temperature gradient load is determined. Finally, the fatigue life of the pavement is calculated from empirical formulas.

Cały proces projektowania wzmocnienia w technologii white-topping jest bardzo rozbudowany. W niniejszej pracy skupiono uwagę na etapie dotyczącym obliczeń mechanistycznych z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES) [8, 9]. W szczególności przeanalizowano wpływ parametrów geometrycznych płyty betonowej na rozkład naprężeń w konstrukcji nawierzchni. Taka analiza umożliwia przeprowadzenie procesu optymalizacji. Zwiększona długość płyty, to mniejsza liczba szwów, co przekłada się na mniejsze zużycie dybli i mniejszą pracochłonność związaną z wykonaniem oraz zabezpieczeniem szwów. Z drugiej strony, powiększenie długości płyty skutkuje wzrostem powstających w niej naprężeń, co w konsekwencji może wymagać zwiększenia grubości nawierzchni. Przedstawiony przykład obliczeniowy miał na celu ujęcie powyższych zależności w sposób ilościowy. Przedstawione podejście daje możliwość optymalizacji kosztów poprzez zmianę założeń projektowych dotyczących wymiarów płyty.

2. MODEL NAWIERZCHNI

2.1. MATERIAŁY

Parametry materiałowe i geometryczne istniejących warstw można wyznaczyć na podstawie wyników badań ugięciomierzem FWD oraz georadarem. Następnie, uwzględniając zmienność parametrów, należy wyznaczyć odcinki jednorodne i przyjęc zastępczy układ warstw o jednakowych właściwościach na całej długości projektowanego odcinka. Przyjęte parametry istniejących warstw konstrukcyjnych zestawiono w Tabl. 1, a ich grubości zaznaczono na Rys. 1.

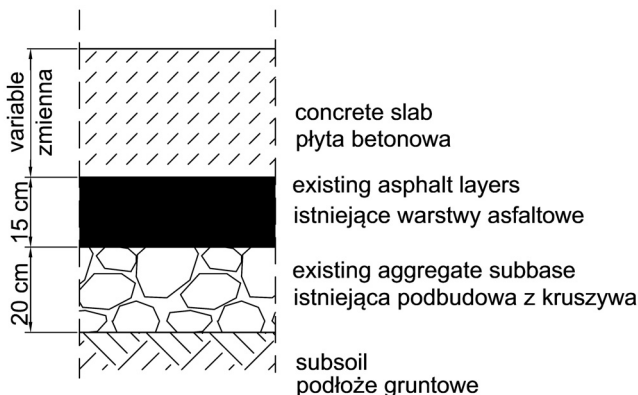


Fig. 1. Assumed layout of pavement layers
Rys. 1. Przyjęty układ warstw konstrukcyjnych nawierzchni

Właściwości materiałowe projektowanej płyty betonowej przyjęto na podstawie [10] i zestawiono w Tabl. 2. Założenia materiałowe różnią się w zależności od przyjętego przypadku obciążenia.

The whole process of designing the whitetopping structural reinforcement is highly elaborate. This paper focuses on the stage dealing with the mechanistic calculations performed using the finite element method (FEM) [8, 9]. In particular, the influence of geometric parameters of concrete slabs on the distribution of stress in the pavement structure is analysed. On the basis of such an analysis one can carry out the optimization process. The longer the slab, the fewer the expansion joints, which translates into fewer dowels and lower labour intensity required to make and protect the joints. On the other hand, the longer the slab, the greater the stresses generated in it, which can make it necessary to increase the thickness of the pavement. The provided calculation example quantitatively illustrates the above interdependences. Using the proposed approach one can optimize the costs by changing the design assumptions concerning the dimensions of the slab.

2. PAVEMENT MODEL

2.1. MATERIALS

The material and geometric parameters of the existing pavement layers can be determined on the basis of FWD and georadar test results. Taking into account the variation of the parameters, one should establish which sections are homogenous, and assume an equivalent system of layers with identical properties along the whole of the section to be designed. The assumed parameters of the existing structural layers are presented in Table 1 and the thicknesses of the layers are shown in Fig. 1.

Table 1. Parameters of existing layers of the flexible pavement structure
Tablica 1. Parametry warstw istniejącej konstrukcji nawierzchni podatnej

Layer Warstwa	Young's moduł Moduł Younga [MPa]	Poisson's ratio Współczynnik Poissona [-]	Thickness Grubość [mm]	Bulk density Gęstość objętościowa [kg/m ³]
Asphaltic pack layers Pakiet asfaltowy	2000	0.35	200	2200
Macadam roadbase Podbudowa z kruszywa	250	0.20	150	2000
Subgrade Podłoże gruntowe	80	0.25	∞	2000

The material properties of the concrete slab to be designed were assumed on the basis of [10] and collected in Table 2. The material assumptions differ depending on the loading case.

Table 2. Assumed material properties of the concrete slab
 Tablica 2. Przyjęte właściwości materiałowe płyty betonowej

Analyzed case Przypadek analizy	Young's modulus Moduł Younga [MPa]	Poisson's ratio Współczynnik Poissona [-]	Coefficient of thermal expansion Współczynnik rozszerzalności cieplnej [1/K]	Bulk density Gęstość objętościowa [kg/m ³]
Wheel load Obciążenie kołem	35000	0.16	–	2400
Temperature gradient load Obciążenie temperaturą	26000	0.20	12.0×10^{-6}	

Na potrzeby analizy przyjęto, że nakładka zostanie wykonana bezpośrednio na istniejących warstwach asfaltowych. W praktyce konieczne jest wykonanie frezowania lub ułożenie warstwy wyrównawczej, ze względu na nierówności nawierzchni oraz dostosowanie do projektowanej niwelety. Warstwę poślizgową uwzględniono przez przyjęcie odpowiedniego współczynnika tarcia pomiędzy projektowaną płytą a istniejącą nawierzchnią asfaltową.

2.2. MODEL MES

Obliczenia mechanistyczne wykonano w odniesieniu do konstrukcji nawierzchni zróżnicowanej pod względem długości oraz grubości płyty betonowej. Geometrię modelu MES przedstawiono na Rys. 2. Zamodelowano warunki kontaktu pomiędzy dolną powierzchnią płyty, a górną powierzchnią podbudowy. Zastosowano model tarcia Coulomba, z możliwością odrywania się płyty od powierzchni podbudowy. Założono współczynnik tarcia o wartości $\mu = 0,8$.

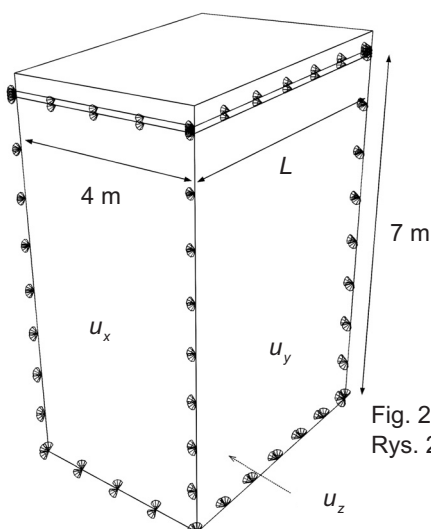


Fig. 2. FEM model geometry
 Rys. 2. Geometria modelu MES

Płyta, poddana działaniu ciężaru własnego, została obciążona w środku najdłuższego jej brzegu (krawędzi). Taki wariant obciążenia wywołuje zwykle największe naprężenia, co przekłada się bezpośrednio na trwałość zmęczeniową konstrukcji. Obciążenie zamodelowano ciśnieniem rozłożonym

It was assumed that the whitetopping would be made directly on the existing asphalt layers. In practice, surface milling needs to be carried out or a levelling course needs to be placed to eliminate surface roughness or to align the surface with the designed road grade-line. A slip layer was taken into account by assuming an appropriate coefficient of friction between the designed slab and the existing asphalt pavement.

2.2. FEM MODEL

Mechanistic calculations were performed for the pavement structure differing in the length and thickness of the concrete slab. The geometry of the FEM model is shown in Fig. 2. The conditions of the contact between the slab's bottom surface and the top surface of the sub-base were modelled. The Coulomb friction model was adopted and the possibility of the slab separation itself from the sub-base surface was taken into account. Friction coefficient $\mu = 0.8$ was assumed.

The slab under its dead weight was loaded in the middle of its longest side (edge). This loading case usually generates the greatest stresses, which directly translates into the fatigue life of the structure. The load was modelled as pressure distributed over an appropriate area in order to obtain an equivalent load corresponding to the wheel load of 115 kN. In addition, the pavement was subjected to the action of a temperature gradient. The thermal gradient of 10°C, with temperature decreasing with slab depth, was assumed.

3. ANALYSIS OF RESULTS

3.1. THERMAL STRESSES

The temperature gradient with which the pavement is loaded causes the deformation (curling) of the concrete slab. This results in the non-uniform distribution of the reaction of the sub-grade and consequently in additional stresses, even if the slab is loaded solely with its dead weight. For calculations it is usually assumed that the slab with unsupported edges rests on an elastic foundation. Then the calculated stress values are reduced through

na odpowiedniej powierzchni w celu uzyskania obciążenia równoważnego, odpowiadającego naciskowi koła osi 115 kN. Ponadto, nawierzchnia została poddana działaniu gradientu temperatury. Przyjęto gradient termiczny o wartości 10°C , przy temperaturze obniżającej się wraz z głębokością płyty.

3. ANALIZA WYNIKÓW

3.1. NAPRĘŻENIA TERMICZNE

Gradient temperatury, którym jest obciążona nawierzchnia, powoduje odkształcenie płyty betonowej (tzw. paczenie). Wskutek tego zjawiska powstaje nierównomierny rozkład reakcji podłoża, co w konsekwencji wywołuje powstanie dodatkowych naprężeń, nawet w przypadku obciążenia płyty wyłącznie ciężarem własnym. Obliczenia wykonuje się zwykle zakładając, że płyta o brzegach swobodnych spoczywa na podłożu sprężystym. Następnie, uzyskane wartości naprężeń są redukowane poprzez współczynnik uwzględniający wzajemne oddziaływania między płytami. Przykładowe wyniki analizy w postaci planów warstwicznych naprężeń przedstawiono na Rys. 3 i 4. Jak widać na rysunkach przy zbliżonych wymiarach długości i szerokości płyty, rozkład naprężeń w kierunku podłużnym i poprzecznym jest podobny. Natomiast w przypadku płyty dłuższej, dominującą rolę odgrywają naprężenia w kierunku podłużnym. Rys. 5 i 6 obrazują natomiast jak zwiększenie długości płyty powoduje również zwiększenie maksymalnego naprężenia rozciągającego oraz jaką redukcję naprężeń można uzyskać przez zaprojektowanie większej grubości nakładki betonowej.

a coefficient expressing the interactions between the slabs. Exemplary analytical results in the form of contour stress plans are presented in Figs 3 and 4. As the figures show, the distribution of stress in the longitudinal direction and in the transverse direction is similar for similar length and width dimensions of the slab. Whereas in the case of a longer slab, the stress in the longitudinal direction predominates. Figs 5 and 6 show how, when the slab's length is increased, also the maximum tensile stresses increase, and what reduction in stress can be obtained by designing a thicker whitetopping.

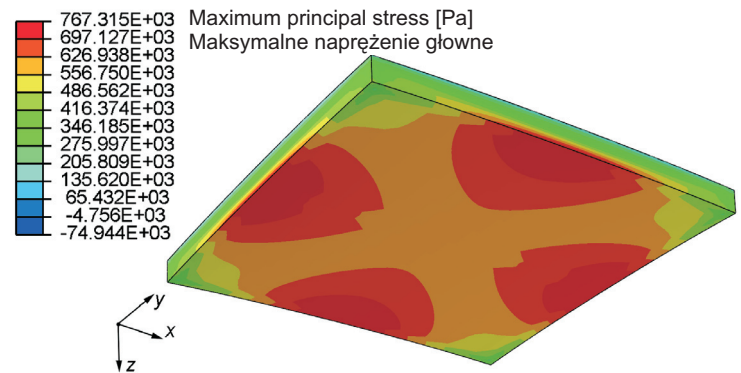


Fig. 3. Principal stresses on the bottom of the slab with a length of 4.0 m and a thickness of 25 cm caused by the temperature gradient

Rys. 3. Naprężenia główne na spodzie płyty o długości 4,0 m i grubości 25 cm, wywołane różnicą wartości temperatury

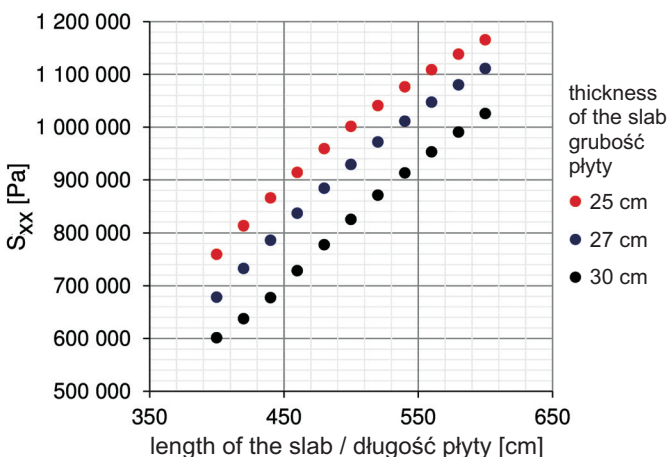


Fig. 5. Maximum tensile stresses in the longitudinal direction S_{xx} caused by the temperature gradient depending on the length of the slab

Rys. 5. Maksymalne naprężenia rozciągające w kierunku podłużnym S_{xx} , wywołane gradientem temperatury w zależności od długości płyty

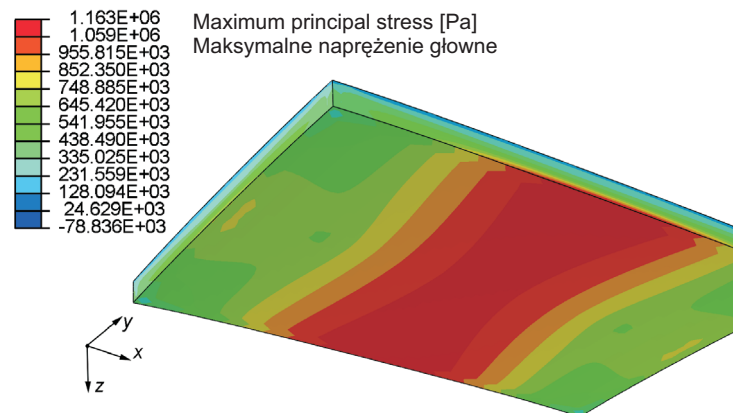


Fig. 4. Principal stresses on the bottom of the slab with a length of 6.0 m and a thickness of 25 cm, caused by the temperature gradient

Rys. 4. Naprężenia główne na spodzie płyty o długości 6,0 m i grubości 25 cm, wywołane różnicą wartości temperatury

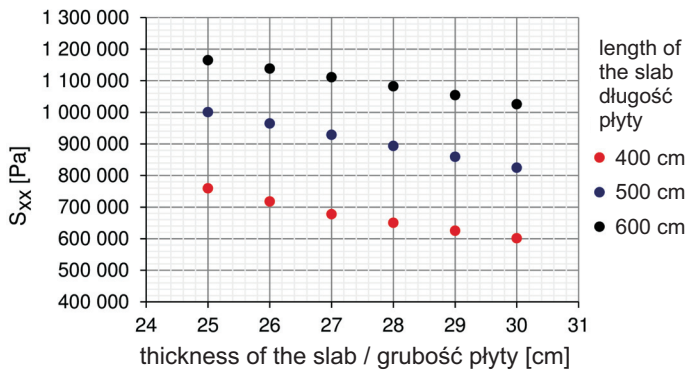


Fig. 6. Maximum tensile stresses in the longitudinal direction S_{xx} caused by the temperature gradient depending on the thickness of the slab

Rys. 6. Maksymalne naprężenia rozciągające w kierunku podłużnym S_{xx} , wywołane gradientem temperatury w zależności od grubości płyty

3.2. NAPRĘŻENIA OD NACISKU KOŁEM POJAZDU

W procesie projektowania konstrukcji nawierzchni betonowych rozważa się zwykle obciążenie od koła pojazdu w czterech konfiguracjach: w środku płyty, w narożu, na środku dłuższej oraz krótszej krawędzi. Zwykle, decydujące okazują się naprężenia wywołane obciążeniem przyłożonym na środku dłuższej krawędzi płyty. Przykładowy plan warstwiczny naprężeń wywołanych obciążeniem na środku dłuższej krawędzi przedstawia Rys. 7. Ze względu na dużą liczbę analizowanych wariantów, zestawiono jedynie wyniki naprężeń rozciągających w kierunku podłużnym, wywołanych najbardziej niekorzystną konfiguracją obciążenia płyty.

Na następnych wykresach (Rys. 8 i 9) zestawiono wyniki obliczeń oddziaływania naprężeń rozciągających na płytę betonową dla wszystkich analizowanych jej długościach i grubościach. Podobnie jak w przypadku obciążenia gradientem temperatury, wraz ze wzrostem długości płyty zwiększają się naprężenia maksymalne, natomiast ich redukcję można uzyskać przez zwiększenie jej grubości.

3.3. PORÓWNANIE WYNIKÓW

W celu porównania wyników uzyskanych dla różnych rodzajów obciążeń (temperatura i koło pojazdu) wykorzystano wielkość naprężenia krytycznego σ^{\max} , która jest składową kryterium projektowania nawierzchni w metodzie mechanicznej [10, 11]. Analizę przeprowadzono pod kątem możliwości optymalizacji wzmocnienia konstrukcji nawierzchni technologią whitetopping, a jej wyniki zostały przedstawione jako kombinacja liniowa naprężeń:

$$\sigma^{\max} = \alpha \sigma_k + \delta \sigma_t, \quad (1)$$

3.2. STRESSES CAUSED BY THE PRESSURE OF VEHICLE WHEEL

When designing concrete pavement structures one considers usually four wheel loading configurations: in the slab's centre, in its corner and in the middle of its respectively longer and shorter edge. The stress generated by the load applied in the middle of the slab's longer edge usually turns out to be decisive. An exemplary contour plan of the stress generated by the load applied in the middle of the longer edge is shown in Fig. 7. Because of the large number of considered variants, only the tensile stresses in the longitudinal direction, generated by the most disadvantageous slab loading configuration, are presented.

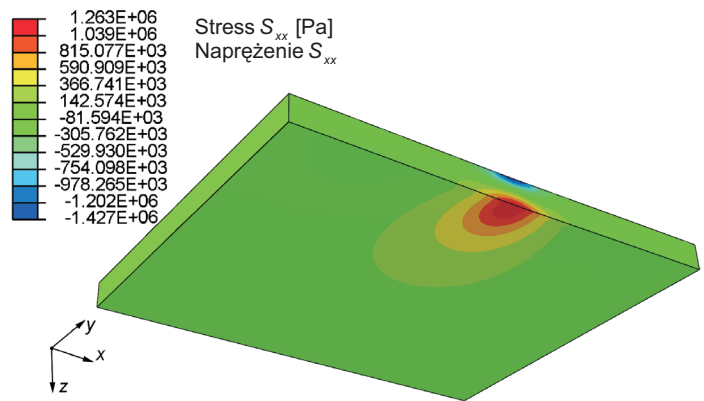


Fig. 7. Longitudinal stresses S_{xx} on the bottom of the slab with a length of 5.0 m and a thickness of 30 cm caused by a load of the wheel in the middle of the long edge of the slab

Rys. 7. Naprężenia w kierunku podłużnym S_{xx} na spodzie płyty o długości 5,0 m i grubości 30 cm, wywołane obciążeniem kołem na środku dłuższej krawędzi płyty

Figs 8 and 9 show diagrams of the effect of tensile stress on the slab for all the considered slab lengths and thicknesses. Similarly as in the case of the temperature gradient loading, as the slab's length increases, so do the maximum stresses. The latter can be reduced by increasing the slab's thickness.

3.3. COMPARISON OF RESULTS

Critical stress σ^{\max} , which is a component of the pavement design criterion in the mechanistic method, was used to compare the results for the different types of loads (temperature and wheel loading) [10, 11]. The analysis was made paying special attention to the possibility of optimizing the pavement structure by means of the whitetopping technology. The results of the analysis are presented as a linear combination of the stresses:

gdzie:

- σ^{\max} – naprężenie krytyczne,
- σ_k – maksymalne naprężenie rozciągające od obciążenia kołem pojazdu,
- σ_t – maksymalne naprężenie rozciągające od obciążenia gradientem temperatury,
- α – współczynnik zmniejszający naprężenie od koła pojazdu uwzględniający współpracę pomiędzy sąsiednimi płytami,
- δ – współczynnik zmniejszający naprężenie od gradientu temperatury, uwzględniający współpracę pomiędzy sąsiednimi płytami oraz powtarzalność obciążeń.

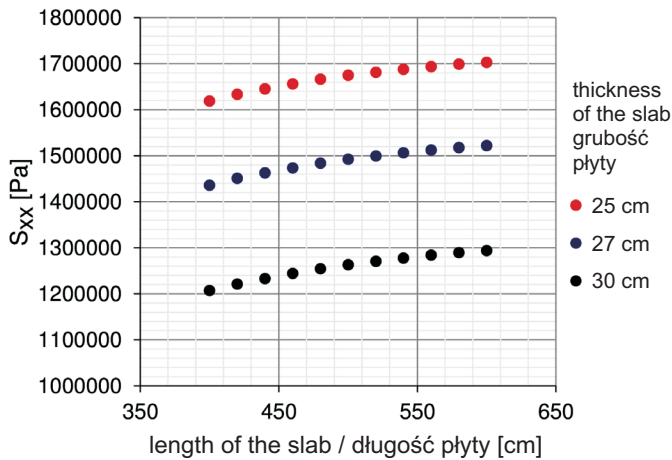


Fig. 8. Maximum tensile stresses in the longitudinal direction S_{xx} caused by the load of the wheel in the center of the long edge of the slab depending on the length of the slab
Rys. 8. Maksymalne naprężenia rozciągające w kierunku podłużnym S_{xx} , wywołane obciążeniem kołem na środku dłuższej krawędzi płyty w zależności od jej długości

Obliczone w ten sposób naprężenie krytyczne zmodyfikowano współczynnikami materiałowymi oraz współczynnikiem zależnym od liczby projektowanych osi obliczeniowych. Następnie porównano je z wytrzymałością betonu na rozciąganie. Dokładne obliczenia trwałości zmęczeniowej nie są jednak przedmiotem niniejszej pracy, ale samo oszacowanie σ^{\max} jest wystarczające w kontekście przedstawienia rozwiązania równoważnego. Dzięki takiemu podejściu można przyjąć o ile należy zwiększyć grubość płyty betonowej, aby po jej wydłużeniu trwałość zmęczeniowa się nie zmniejszyła. Wykorzystując przedstawiony na Rys. 10 nomogram można znaleźć rozwiązania równoważne pod względem trwałości zmęczeniowej. Na przykład płyta betonowa o długości 5,0 m i grubości 26 cm będzie miała taką samą trwałość jak płyta

where:

- σ^{\max} – the critical stress,
- σ_k – the maximum tensile stress produced by wheel loading,
- σ_t – the maximum tensile stress produced by temperature gradient loading,
- α – a coefficient reducing the stress generated by wheel loading, taking into account the interaction between the adjacent slabs,
- δ – a coefficient reducing the stress generated by temperature gradient loading, by taking into account the interaction between the adjacent slabs and load repetitiveness.

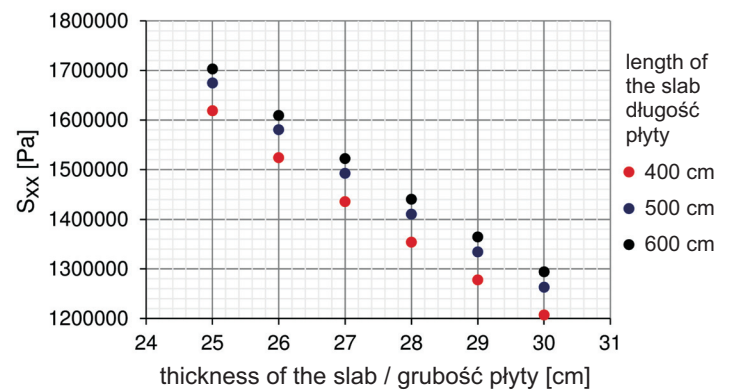


Fig. 9. Maximum tensile stresses in the longitudinal direction S_{xx} caused by the load of the wheel in the center of the long edge of the slab depending on the thickness of the slab
Rys. 9. Maksymalne naprężenia rozciągające w kierunku podłużnym S_{xx} , wywołane obciążeniem kołem na środku dłuższej krawędzi płyty w zależności od jej grubości

The critical stresses calculated in this way were modified with the material factors and with a coefficient dependent on the number of design standard axles. Then they were compared with the tensile strength of the concrete. It should be noted that detailed fatigue life calculations are not the subject of this study and that from the equivalent solution point of view it is sufficient to estimate σ^{\max} . Owing to this approach one can assume by how much the of concrete slab thickness should be increased so that the fatigue life of the slab does not diminish after the latter is elongated. Using the nomograph shown in Fig. 10 one can find solutions equivalent as regards fatigue life. For example, a 5.0 m long and 26 cm thick concrete slab will have the same durability as a 6.0 m long and about 29.5 cm thick slab. Such calculations can be the basis for cost-benefit analyses aimed at optimizing pavement reinforcement

o długości 6,0 m i grubości około 29,5 cm. Tego typu obliczenia mogą być podstawą do analiz ekonomicznych mających na celu optymalizację kosztów wykonania wzmocnienia nawierzchni. Należy podkreślić, że uzyskana zależność jest słuszna jedynie w określonych warunkach terenowych oraz eksploatacyjnych i dlatego tak ważne jest indywidualne podejście do każdego projektu.

4. Dyskusja

Obliczenia wykonane z zastosowaniem metody elementów skończonych (MES), potwierdzają intuicyjnie wyprowadzone zależności. Wraz ze wzrostem długości płyty betonowej wzrastają maksymalne naprężenia, pochodzące zarówno od temperatury jak i od koła pojazdu. Natomiast zwiększenie grubości płyty powoduje ich redukcję. Zyskanie dokładnych wyników pozwala ująć zjawisko w sposób ilościowy. Dzięki temu możliwe jest także poszukiwanie rozwiązania optymalnego. Im dłuższa płyta betonowa, tym mniej szczelin przypada na kilometr drogi i tym samym można zastosować mniej dybli. Wymaga to jednak zwiększenia grubości płyty w celu zachowania jej odpowiedniej trwałości zmęczeniowej. Rozwiązanie optymalne będzie w każdym przypadku zależało zarówno od miejscowych warunków (podłoże, istniejąca konstrukcja nawierzchni), projektowanego obciążenia nawierzchni, jak również od cen dostępnych materiałów oraz kosztów robocizny.

Artykuł ten nie wyczerpuje tematyki optymalizacji kosztów remontu nawierzchni betonowych. Wiele zagadnień wymaga uszczegółowienia lub kompleksowego przedstawienia, m.in. ilościowego ujęcia kosztów, rozpatrzenia dodatkowych kombinacji obciążeń związanych z innymi położeniami koła pojazdu oraz wzajemnego oddziaływania płyt [12, 13]. Ponadto w bardziej szczegółowych analizach należy koniecznie zwrócić uwagę na siły powstające w dyblach oraz koncentracje naprężeń w betonie – w strefach kontaktu z dyblami [14, 15].

Przyjęta i opisana metodyka w sposób uproszczony traktuje łączny wpływ obciążeń eksploatacyjnych i temperaturowych. Naprężenia od powyższych oddziaływań są obliczone oddzielnie, z zastosowaniem MES, a następnie korygowane odpowiednimi współczynnikami. Nie zawsze lokalizacje maksymalnych naprężeń spowodowanych temperaturą i oddziaływaniem koła pojazdu pokrywają się ze sobą. W związku z tym przyjmowany jest pewien zapas bezpieczeństwa, ale wówczas wynik obliczeń jest mniej dokładny. Metoda elementów skończonych umożliwia przeprowadzenie analizy jednoczesnego wpływu temperatury i obciążeń eksploatacyjnych. Wyniki takich obliczeń, mogą różnić się w przypadku, jeżeli powyższe obciążenia zostaną uwzględnione oddzielnie. Przyczyną może być chociażby zjawisko curlingu [16, 17], które objawia się deformacją (wypaczeniem) płyty pod

costs. It should be noted that the obtained dependence is valid for the specific local operating conditions and that is why an individual approach to each project is so important.

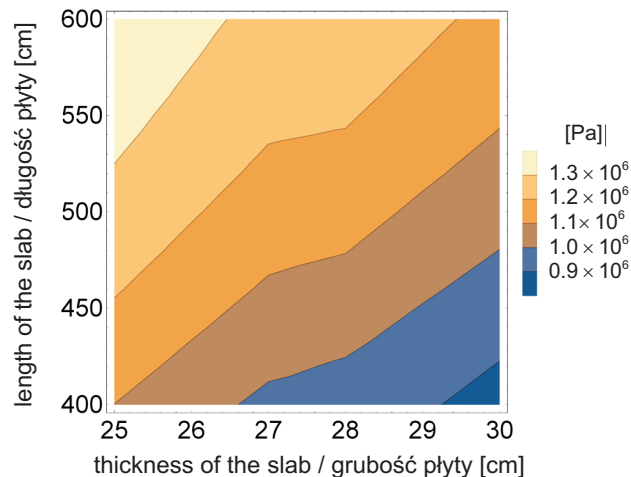


Fig. 10. Dependence of the critical stress on the length and thickness of the designed slab

Rys. 10. Zależność naprężenia krytycznego od długości i grubości projektowanej nakładki

4. Discussion

The FEM calculations confirm the intuitively derived dependences. As the length of the concrete slab increases, so do the maximum stresses originating from both temperature and wheel loading. Whereas they are reduced when the thickness of the slab is increased. The considered phenomenon can be quantitatively expressed on the basis of the obtained precise results. Thus it becomes possible to search for an optimum solution. The longer the concrete slab, the fewer the expansion joints per road kilometre and consequently, fewer dowels are used. But the slab's thickness must be increased to preserve its proper fatigue life. In each case the optimum solution will depend on the local conditions (the subsoil and the existing pavement structure) and the design pavement load as well as on the prices of the available materials and the labour costs.

This paper does not exhaust the subject of concrete pavement renewal cost optimization. Many of the problems need to be elaborated or comprehensively presented, e.g. the costs must be quantitatively expressed and additional load combinations resulting from other vehicle wheel positions, and the interaction between the slabs need to be considered [12, 13]. Moreover, in more detailed analyses one must pay special attention to the forces arising in the dowels and to stress concentrations in the concrete (in the concrete-dowel contact zones) [14, 15].

wpływem temperatury, a nawet odrywaniem się jej od podłoża. Nierównomierne podparcie wpływa na wyniki naprężeń pochodzących od obciążenia kołem pojazdu. Ze względu na mnogość przypadków do przeanalizowania, takie obliczenia można przeprowadzić dopiero w docelowym projekcie nawierzchni, gdy liczba wariantów konstrukcyjnych jest już ograniczona do kilku.

Należy też zwrócić uwagę, że pod wpływem cyklicznych zmian temperatury (w szczególności zamrażania i odmrażania), w betonie mogą zachodzić zmiany niekorzystne ze względu na jego trwałość. Zakłada się jednak, że efekt ten można pominąć, gdyż betony drogowe powinny spełniać rygorystyczne wymagania dotyczące mrozoodporności [18]. Przeprowadzona analiza wykazała, że obliczenia mechaniczne dają możliwość optymalizacji kosztów remontu nawierzchni betonowych. Jednak ze względu na złożoność zagadnienia, poszukiwanie optymalnego rozwiązania powinno być przedmiotem każdego indywidualnego projektu.

5. WNIOSKI

Przeanalizowano 66 wariantów (6 różnych grubości i 11 różnych długości) cienkiej nakładki betonowej (*whitetopping*), obciążonej zarówno gradientem temperatury, jak i kołem pojazdu. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń można wyciągnąć następujące wnioski:

- Zarówno zmiana długości, jak i grubości płyty, istotnie wpływają na naprężenia pochodzące od obciążeń termicznych i eksploatacyjnych.
- Zwiększenie długości płyty także powoduje wzrost naprężeń w płycie, przy czym wpływ ten jest istotniejszy w przypadku obciążenia spowodowanego gradientem temperatury. Zmiana długości analizowanej płyty z 400 cm do 600 cm wywołuje wzrost naprężeń pochodzących od temperatury o około 420 kPa oraz wzrost naprężeń wywołanych obciążeniem kołem o około 90 kPa.
- Zwiększenie grubości płyty powoduje zmniejszenie naprężeń, przy czym wpływ ten jest bardziej znaczący w przypadku obciążenia kołem. Zwiększenie grubości analizowanej płyty z 25 cm do 30 cm powoduje zmniejszenie naprężeń od obciążenia kołem o około 400 kPa oraz redukcję naprężeń temperaturowych o około 160 kPa.
- Przedstawiony na Rys. 10 w formie nomogramu wykres zależności naprężenia krytycznego od długości i grubości płyty betonowej – sporządzony z wykorzystaniem równania (1) – umożliwia wyznaczanie rozwiązań równoważnych pod względem trwałości zmęczeniowej w postaci obliczonych naprężeń zastępczych.

The proposed methodology treats the combined effect of service and temperature loads in a simplified way. The stresses generated by the above factors are calculated separately (using FEM) and then corrected with appropriate coefficients. The locations of the maximum stresses caused by temperature and wheel loading do not always coincide and so a certain safety margin is assumed, but then the result of the calculations is less accurate. Using the finite element method one can analyse the combined effect of temperature and service loads. The results of such calculations can differ from the ones obtained when the above loads are considered separately. This can be due to, e.g. curling [16, 17], which manifests itself in the deformation of the slab under the influence of temperature, and even in its separation from the sub-base. The non-uniformity of the support affects the wheel loading stress results. Because of the large number of cases to be considered, such calculations can be carried out only for the ultimate pavement design in which the number of design variants has been limited to a few.

One should also note that under the influence of cyclic temperature variation (especially freeze-thaw cycles) changes can occur in the concrete, which can adversely affect its durability. Nevertheless, it is assumed that this effect can be omitted since pavement quality concretes should meet rigorous freeze-thaw durability requirements [18]. This study has shown that the costs of rehabilitating concrete pavements can be determined through mechanistic calculations. However, because of the complexity of the problem, an optimum solution should be sought in each individual case.

5. CONCLUSIONS

Sixty six variants (6 different thicknesses and 11 different lengths) of a concrete overlay (*whitetopping*) loaded with both a temperature gradient and a vehicle wheel were analysed. The following conclusions can be drawn from the calculations:

- Both a change in slab length and a change in slab thickness significantly affect the stresses generated by thermal and service loads.
- The effect of an increase in slab length, resulting in an increase in stress in the slab, is more significant in the case of temperature gradient loading. As a result of a change in the length of the analysed slab from 400 cm to 600 cm the stress generated by temperature increases by about 420 kPa while the stress produced by wheel loading increases by about 90 kPa.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 r w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie. Dz. U. z 1999r. Nr 43, poz. 430, tekst jednolity Dz. U. z 2016 r., poz. 124
- [2] *Szydło A.* (red.): Katalog typowych konstrukcji nawierzchni sztywnych. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Instytut Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej, Warszawa 2014
- [3] *Judycki J.* (red.): Katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych. Politechnika Gdańska, Gdańsk 2014
- [4] *Sybilski D.* (red.): Katalog przebudów i remontów nawierzchni podatnych i półsztywnych. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa 2013
- [5] *Żurawicka A.*: Thin bonded concrete overplays for strengthening of road pavement. Part I. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **2**, 4, 2003, 63-98
- [6] *Graczyk M.*: Nośność konstrukcji nawierzchni wielowarstwowych w krajowych warunkach klimatycznych. Studia i materiały, IBDiM, zeszyt 63, Warszawa, 2010
- [7] *Pozarycki A., Górnaś P., Sztukiewicz R.*: Application of mechanical and electromagnetic waves in an integrated determination of pavement bearing capacity. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **16**, 2, 2017, 101-114, DOI: 10.7409/rabdim.017.007
- [8] *Graczyk M., Zbiciak A., Józefiak K.*: Design of airport pavements with use of analytical methods and FEM. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **14**, 2, 2015, 101-115, DOI: 10.7409/rabdim.015.007
- [9] *Zienkiewicz O.C.: Taylor R.L.*: The Finite Element Method. The 5th ed. Butterworth-Heinemann, Oxford 2000
- [10] *Szydło A.*: Nawierzchnie drogowe z betonu cementowego: teoria, wymiarowanie, realizacja. Polski Cement, Kraków, 2004
- [11] *Lewinowski A.*: Wymiarowanie konstrukcji jezdni drogowych z betonu cementowego. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1982
- [12] *Das A.*: Analysis of pavement structures. CRC Press, Boca Raton, 2015
- [13] *Papagiannakis A.T., Masad E.A.*: Pavement Design and Materials, John Wiley & Sons, 2008
- [14] *Mackiewicz P.*: Analysis of stresses in concrete pavement under a dowel according to its diameter and load transfer efficiency. Canadian Journal of Civil Engineering, **42**, 11, 2015, 845-853, DOI: 10.1139/cjce-2014-0110
- The effect of an increase in slab thickness, resulting in a stress reduction, is more significant in the case of wheel loading. As a result of an increase in the length of the analysed slab from 25 cm to 30 cm the stress caused by wheel loading decreases by about 400 kPa while the stress generated by temperature decreases by about 160 kPa.
 - Using the nomograph of the dependence between the critical load and the length and thickness of the concrete slab, based on equation (1), one can determine solutions, equivalent in terms of fatigue life, in the form of calculated equivalent stresses.
- [15] *Mackiewicz P.*: Thermal stress analysis of jointed plane in concrete pavements. Applied Thermal Engineering, **73**, 1, 2014, 1167-1174, DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.09.006
- [16] *Graczyk M., Gajewski M., Szczerba R.*: Structural analysis of airfield concrete pavement with doweled joints taking into account curling of slabs. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **15**, 2, 2016, 137-155, DOI: 10.7409/rabdim.016.009
- [17] *Kim M.O., Bordelon A.C., Lee N.K.*: Early-age crack widths of thin fiber reinforced concrete overlays subjected to temperature gradients. Construction and Building Materials, **148**, 2017, 492-503, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.099
- [18] *Glinicki M.A., Jaskulski R., Dąbrowski M.*: Design principles and testing of internal frost resistance of concrete for road structures - critical review. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **15**, 1, 2016, 21-43, DOI: 10.7409/rabdim.016.002