



JAROSŁAW GÓRSZCZYK¹⁾
WANDA GRZYBOWSKA²⁾

ANALIZY TERMICZNE ASFALTOWEJ NAWIERZCHNI DROGOWEJ Z WYKORZYSTANIEM MES

STRESZCZENIE. W artykule omówiono wybrane wyniki komputerowej symulacji rozkładu temperatury w drogowych nawierzchniach asfaltowych, których konstrukcje zostały dobrane dla kategorii obciążenia ruchem KR4 i KR6. W obu przypadkach konstrukcji przedstawiono po 5 wariantów, różniących się właściwościami termicznymi zastosowanych materiałów; współczynnik przewodzenia ciepła λ określono na podstawie badań własnych, nie zróżnicowano warunków brzegowych. We wszystkich wariantach temperaturę górnej powierzchni nawierzchni przyjęto z polowych pomiarów własnych dokonanych w Krakowie.

Zjawisko przewodzenia ciepła wewnątrz nawierzchni drogowej opisanego równaniem przewodnictwa cieplnego Fouriera-Kirchhoffa rozwiązano numerycznie stosując metodę elementów skończonych (MES). Analizy przeprowadzono w systemie ANSYS z wykorzystaniem modułu Multiphysics, przy założeniu jednokierunkowego przewodzenia ciepła, jednorodności i izotropii materiałów, z jakich wykonane są poszczególne warstwy. Rozkład temperatury w nawierzchni drogowej w chwili początkowej wyznaczono wykorzystując analizę stacjonarną z określonymi dla danej chwili warunkami brzegowymi. Przedstawiono przebiegi rozkładu temperatury w nawierzchni, analizy statystyczne wartości temperatury na spodzie podbudowy asfaltowej dla różnych wariantów oraz wykresy wrażliwości temperatury na wybrany parametr. W celu sprawdzenia poprawności zastosowanego podejścia porównano wyniki symulacji z rzeczywistymi wartościami temperatury pomierzonymi na różnych głębokościach nawierzchni o układzie warstw zbliżonym do analizowanej konstrukcji dla KR4.

SŁOWA KLUCZOWE: asfaltowa nawierzchnia drogowa, metoda elementów skończonych, temperatura, przewodzenie ciepła

¹⁾ dr inż. – Katedra Budowy Dróg i Inżynierii Ruchu, Politechnika Krakowska

²⁾ dr inż. – Katedra Budowy Dróg i Inżynierii Ruchu, Politechnika Krakowska

1. WSTĘP

Mieszanki mineralno-asfaltowe stanowiące tworzywo nawierzchni asfaltowych są materiałem termoreologicznym, ponieważ charakter pracy nawierzchni jest ściśle związany z temperaturą. W ogólności można wymienić dwa powody prowadzenia analiz termicznych:

- a) dobór własności składników i mieszanek dla zminimalizowania deformacji lepkoplastycznych, a także spękań termicznych w warstwach z mieszanek mineralno-asfaltowych,
- b) określenie temperatury miarodajnej dla wyznaczania modułów sztywności mieszanek jako podstawowego parametru materiałowego w projektowaniu konstrukcji.

Problem obliczania temperatury konstrukcji asfaltowej nawierzchni drogowej został opisany m.in. w pracach Mieczkowskiego [1] i Hermansson'a [2]. W publikacji [1] przedstawiono model fizyczny obejmujący zjawiska radiacji i konwekcji, które występują podczas wymiany ciepła między nawierzchnią asfaltową a otoczeniem. Model ten umożliwia wyznaczanie temperatury na powierzchni warstwy ścieralnej, opierając się na temperaturze powietrza oraz dodatkowych parametrach klimatyczno-pogodowych. W omawianej pracy zamieszczono wyniki weryfikacji empirycznej modelu opracowanego przez Mieczkowskiego dla temperatury powierzchni warstwy ścieralnej. Dla przykładu, różnica pomiędzy temperaturą teoretyczną a rzeczywistą nawierzchni według wyników pracy wyniosła 2,9 °C.

W pracy [2] Hermansson zaproponował natomiast metodę obliczania temperatury dla całej konstrukcji asfaltowej nawierzchni drogowej, bazującą na odczytywaniu temperatury powierzchni w trakcie pomiaru ugięciomierzem FWD (warunek brzegowy) i rozwiązywaniu równania przewodnictwa cieplnego Fouriera za pomocą metody różnic skończonych. Autor opisał również w celach porównawczych inne stosowane metody, służące do szacowania temperatury warstw asfaltowych: oryginalną metodę BELLS'a, zmodyfikowaną metodę BELLS'a3, metodę Park'a. W pracy oceniono także skuteczność empiryczną poszczególnych metod. Porównując dane pomiarowe z obliczeniowymi uzyskanymi w okresie 23 dni (pomiar co 30 minut) oszacowano średni błąd, który w metodzie Hermansson'a jak uprzednio już wspomniano, wyniósł mniej niż 1,0 °C. Maksymalny błąd (2,6 °C) określony dla godziny 8⁰⁰ zmniejszył się do 1,0 °C w przeciągu następnej godziny. Pomiarzy wykonano na różnych głębokościach (od 10 mm do 200 mm od powierzchni), zarówno w dni zachmurzone jak i słoneczne. Zmierzona temperatura powietrza wykorzystana została jako dana wejściowa w symulacji rozkładów temperatury.

Alternatywą dla wyżej wymienionych metod wyznaczania temperatury w asfaltowej nawierzchni drogowej jest zastosowane w artykule podejście oparte na rozwiązywaniu równania przewodnictwa cieplnego Fouriera-Kirchhoffa wraz ze swoją szczególną postacią równaniem Laplace'a jako warunkiem początkowym za pomocą metody elementów skończonych z wykorzystaniem systemu ANSYS. Głównym przedmiotem badań i analiz w ramach Projektu [3] było modelowanie zachowania się asfaltowej

nawierzchni drogowej w różnych warunkach kontaktu międzywarstwowego (także z zastosowaniem geosyntetyków), która to problematyka wymagała na wstępie rozpoznania rozkładu temperatur w konstrukcji nawierzchni.

2. OGÓLNE SFORMUŁOWANIE MES DLA ZJAWISKA PRZEWODZENIA CIEPŁA W ASFALTOWEJ NAWIERZCHNI DROGOWEJ

Zjawisko przewodzenia ciepła w nawierzchni drogowej można opisać znanym równaniem przewodnictwa cieplnego Fouriera-Kirchhoffa [4]:

$$\operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad}T) - c \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

Równanie (1), przy założeniu jednokierunkowego przewodzenia ciepła, jednorodności i izotropii materiałów, z jakich wykonane są poszczególne warstwy, przybiera ogólną postać (2). Równanie przepływu ciepła (2) ulega uproszczeniu do równania Laplace'a, (3), gdy analizujemy szczególny przypadek wymiany ciepła – przepływ stacjonarny [4]:

$$\lambda \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} - c \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (3)$$

$$q = -\lambda \cdot \frac{dT}{dy} \quad (4)$$

przy czym:

ρ – gęstość [kg/m^3],

c – ciepło właściwe [$\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$],

t – czas [s],

λ – współczynnik przewodzenia ciepła [$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$],

y – głębokość w układzie nawierzchnia - grunt [m],

T – temperatura [$^{\circ}\text{C}$],

q – gęstość strumienia ciepła [W/m^2].

Równanie (4) jest nazywane prawem Fouriera, według którego gęstość przewodzonego strumienia ciepła q jest wprost proporcjonalna do gradientu temperatury.

Jako warunki brzegowe można przyjąć warunki brzegowe I rodzaju:

$T(t, \Sigma)$ – temperatura górnej warstwy nawierzchni asfaltowej [$^{\circ}\text{C}$],

$T(t, \Gamma)$ – temperatura gruntu na głębokości 5 m, przyjęta jako średnioroczna temperatura powietrza dla danego obszaru [$^{\circ}\text{C}$],

warunek początkowy, czyli rozkład $T(0,y)$, wyznaczony z analizy stacjonarnej (3), gdzie:

Σ – górna powierzchnia konstrukcji nawierzchni,

Γ – powierzchnia gruntu na głębokości 5 m.

Problem przewodzenia ciepła wewnątrz nawierzchni drogowej opisanego równaniem (2) rozwiązano stosując metodę elementów skończonych (MES). W postaci macierzowej zależność (2) ma postać [5]:

$$[C] \cdot \{\dot{T}\} + [K_{th}] \cdot \{T\} = -\{Q\}, \quad (5)$$

gdzie:

$[C]$ – globalna macierz pojemności cieplnej konstrukcji [$J/^\circ C$],

$\{\dot{T}\}$ – globalny wektor pochodnych po czasie temperatur węzłowych [$^\circ C/s$],

$[K_{th}]$ – globalna macierz przewodności cieplnej konstrukcji [$W/^\circ C$],

$\{T\}$ – globalny wektor temperatur węzłowych [$^\circ C$],

$\{Q\}$ – globalny wektor strumienia ciepła [W].

Wyznaczenie rozkładu temperatur w nawierzchni drogowej dla chwili początkowej następuje w wyniku przeprowadzenia analizy stacjonarnej z określonymi dla danej chwili warunkami brzegowymi. Ogólne sformułowanie MES zagadnienia (dla równania 3) jest następujące:

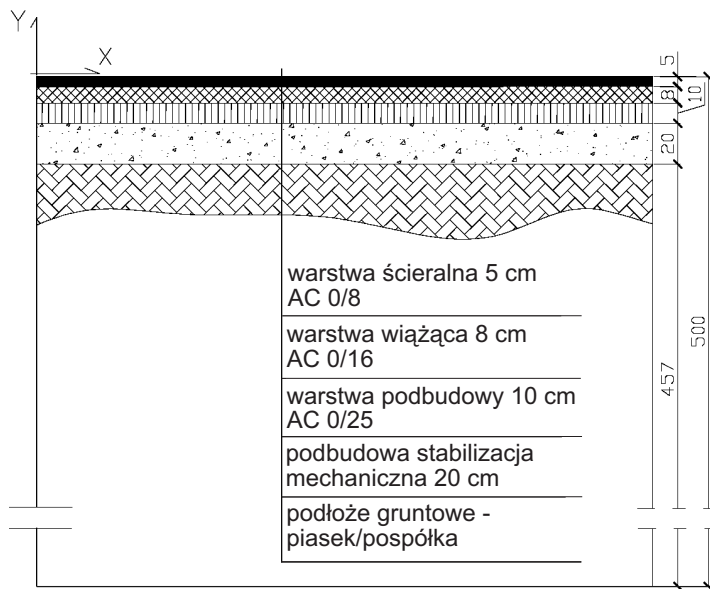
$$[K_{th}] \cdot \{T\} = -\{Q\}, \quad (6)$$

gdzie zastosowano oznaczenia jak w równaniu (5).

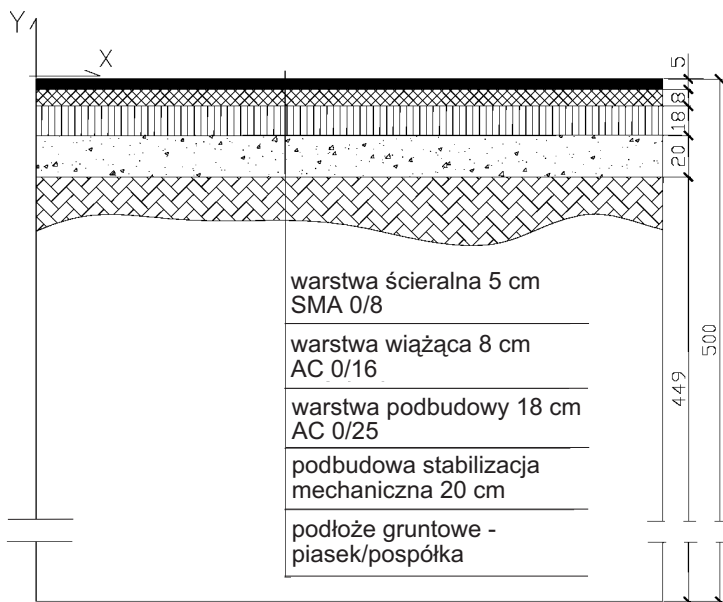
3. OPIS KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI PRZYJĘTYCH DO ANALIZ TERMICZNYCH

Przedmiotem analizy były podatne, asfaltowe nawierzchnie drogowe o grubości konstrukcji odczytanej z Katalogu [6] dla obciążenia ruchem średnim i bardzo ciężkim, tj. KR4 i KR6. Układ warstw pokazano na rysunkach 1 i 2. Dane materiałowe warstw potrzebne do symulacji komputerowej zamieszczono w tablicy 1. Są nimi: współczynnik przewodzenia ciepła λ i gęstość strukturalna ρ – określone z badań własnych oraz ciepło właściwe c – przyjęte na podstawie literatury [2], [7].

Badania współczynnika przewodności cieplnej λ wykonano dla próbek w kształcie płyt o wymiarach $305 \times 305 \times 50$ mm metodą ciepłomierzową oraz dla kontroli metodą skrzynki pomiarowej z użyciem watomierza w klasie 0.2. Opis badania wraz z wszystkimi wynikami zamieszczono w pracy [3]. Dla obydwu konstrukcji rozwiązano po 5 wariantów, różniących się właściwościami termicznymi materiałów zastosowanych do układu warstw (tabl. 2), warunków brzegowych nie zróżnicowano. We wszystkich wariantach temperaturę górnej powierzchni nawierzchni przyjęto



Rys. 1. Układ warstw nawierzchni przyjęty dla obciążenia KR4
Fig. 1. Pavement's layer system for medium traffic (KR 4) assumed for analysis



Rys. 2. Układ warstw nawierzchni przyjęty dla obciążenia KR6
Fig. 2. Pavement's layer system for very heavy traffic (KR 6) assumed for analysis

z polowych pomiarów własnych dokonanych w Krakowie, w okresie od 27.09.2006 do 15.10.2006. Dla analiz MES, aby ograniczyć czasochłonność obliczeń, przedział czasu zawężono do okresu 10 dni: 29.09÷09.10.2006. Temperaturę na głębokości 5 m w gruncie przyjęto wg [2], [8], jako średnioroczną temperaturę powietrza dla obszaru Polski, tj. równą 8,2 °C. Warunki początkowe, tzn. rozkłady temperatury po głębokości, zostały wyznaczone dla wariantów przez rozwiązanie przypadku stacjonarnego przepływu ciepła, z warunkami brzegowymi dla warstwy ścieralnej 14,6 °C (pomierzona temperatura warstwy ścieralnej z godziny 8⁰⁰ rano, z dnia 29.09.2006) i gruntu na głębokości 5 m wynoszącej 8,2 °C.

Tablica 1. Dane materiałowe do symulacji komputerowej
Table 1. Material data for the computer simulation

	Warstwy nawierzchni	λ [W/m°C]	ρ [kg/m ³]	c [J/kg°C]
1	Warstwa ścieralna z SMA (kruszywo magmowe)	0,71	2448	860
2	Warstwa ścieralna z AC (kruszywo magmowe)	0,75	2448	860
3	Warstwa wiążąca z AC (kruszywo magmowe)	0,95	2571	860
4	Warstwa wiążąca z AC (kruszywo węglanowe)	0,68	2427	860
5	Podbudowa zasadnicza z AC (kruszywo magmowe)	0,95	2571	860
6	Podbudowa zasadnicza z AC (kruszywo węglanowe)	0,68	2427	860
7	Podbudowa pomocnicza – żużel wielkopiecowy	0,24 wg [9]	1080	750
8	Podłoże gruntowe – piasek	0,58 wg [7]	1750	960
9	Podłoże gruntowe – pospółka (3% wody)	2,50 wg [9]	1990	955

Przykłady rozkładu temperatury w nawierzchni dla obciążenia KR4 i KR6 w chwili $t = 0$ s, warunek początkowy dla wariantu 1 (kruszywo magmowe) przedstawiono w punkcie 4.2 artykułu.

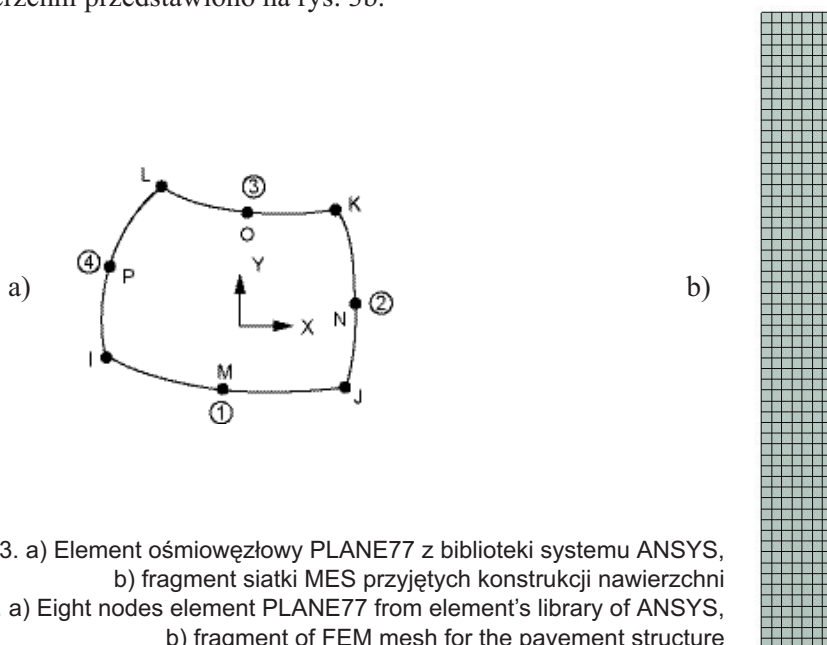
Tablica 2. Analizowane warianty nawierzchni o grubości jak dla obciążenia KR4 i KR6
 Table 2. Variants of the asphalt structure for medium traffic and very heavy traffic

	Wariant 1	Wariant 2	Wariant 3	Wariant 4	Wariant 5
1	warstwa ścieralna z AC (dla KR4) lub z SMA (dla KR6) (kruszywo magmowe)	warstwa ścieralna z AC (dla KR4) lub z SMA (dla KR6) (kruszywo magmowe)	warstwa ścieralna z AC (dla KR4) lub z SMA (dla KR6) (kruszywo magmowe)	warstwa ścieralna z AC (dla KR4) lub z SMA (dla KR6) (kruszywo magmowe)	warstwa ścieralna z AC (dla KR4) lub z SMA (dla KR6) (kruszywo magmowe)
2	warstwa wiążąca z AC (kruszywo magmowe)	warstwa wiążąca z AC (kruszywo węglanowe)	warstwa wiążąca z AC (kruszywo węglanowe)	warstwa wiążąca z AC (kruszywo magmowe)	warstwa wiążąca z AC (kruszywo magmowe)
3	podbudowa zasadnicza z AC (k. magmowe)	podbudowa zasadnicza z AC (k. węglanowe)	podbudowa zasadnicza z AC (k. magmowe)	podbudowa zasadnicza z AC (k. węglanowe)	podbudowa zasadnicza z AC (k. magmowe)
4	podbudowa pomocnicza żużel wielkopiecowy	podbudowa pomocnicza żużel wielkopiecowy	podbudowa pomocnicza żużel wielkopiecowy	podbudowa pomocnicza żużel wielkopiecowy	podbudowa pomocnicza żużel wielkopiecowy
5	podłoże gruntowe – piasek	podłoże gruntowe – piasek	podłoże gruntowe – piasek	podłoże gruntowe – piasek	podłoże gruntowe – pospółka

4. MODEL MES ZJAWISKA PRZEWODZENIA CIEPŁA W ASFALTOWEJ NAWIERZCHNI DROGOWEJ W SYSTEMIE ANSYS

4.1. PRZYGOTOWANIE MODELU

Analizy termiczne przeprowadzono w systemie ANSYS w module Multiphysics. Do budowy modeli 2D użyto ośmiowęzłowych elementów izoparametrycznych PLANE77 o jednym stopniu swobody w węźle (temperatura), rys. 3a. Przyjęty przedział czasowy analizy termicznej to 864000 sekund (240 godzin tj. 10 dni). Siatkę MES modelu nawierzchni przedstawiono na rys. 3b.



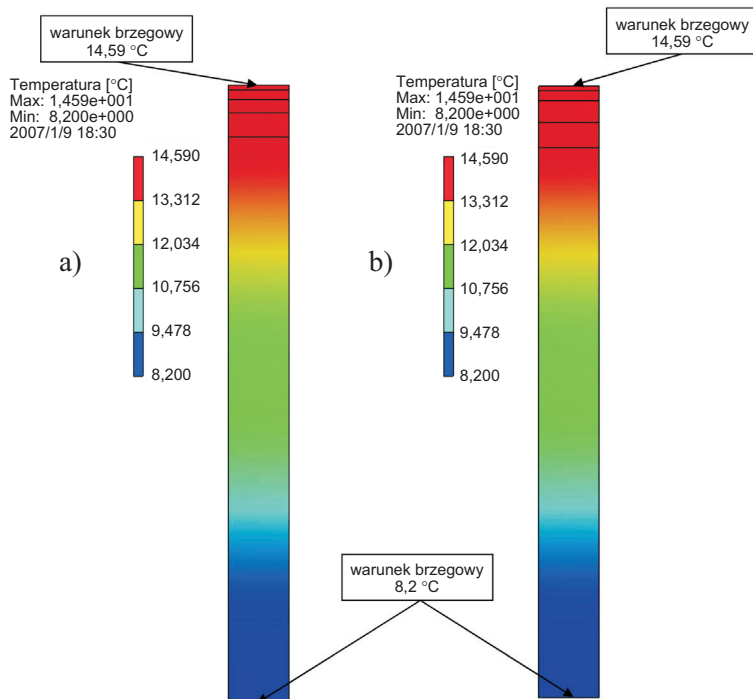
Rys. 3. a) Element ośmiowęzłowy PLANE77 z biblioteki systemu ANSYS, b) fragment siatki MES przyjętych konstrukcji nawierzchni
 Fig. 3. a) Eight nodes element PLANE77 from element's library of ANSYS, b) fragment of FEM mesh for the pavement structure

4.2. WYNIKI SYMULACJI ZJAWISKA PRZEWODZENIA CIEPŁA W NAWIERZCHNI

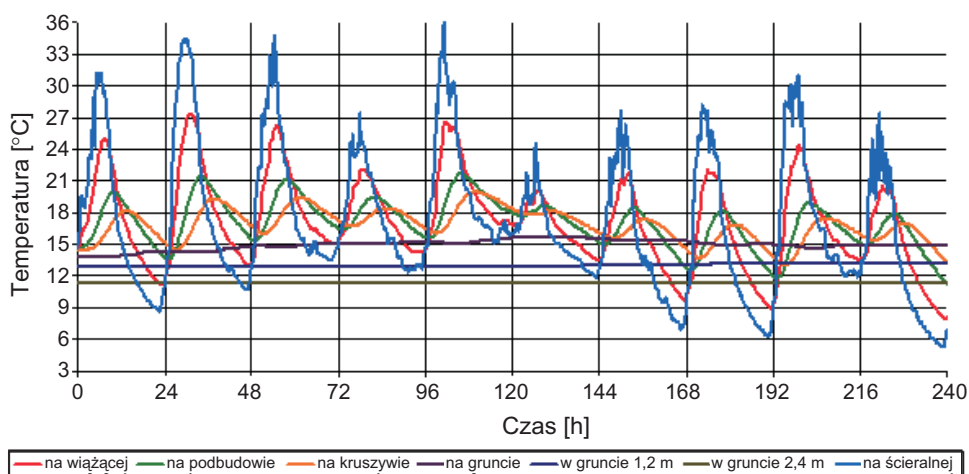
Przykłady rozkładu temperatury w chwili $t = 0$ s przedstawiono na rysunku 4.

Przykładowe wyniki ciepła analiz numerycznych w postaci przebiegu temperatury wewnątrz nawierzchni, dla okresu 240 godzin przedstawiono na rysunkach 5 ÷ 14. Oznaczenie na wykresach: „na warstwie ścieralnej” odnosi się do pomierzonej temperatury w badaniach polowych – jest to warunek brzegowy dla analiz niestacjonarnych.

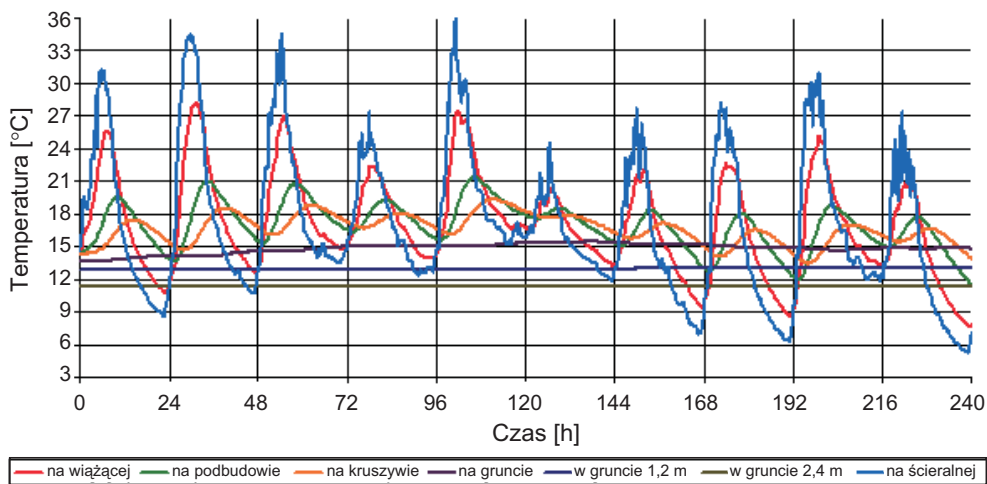
Zestawienie wartości maksymalnych i minimalnych temperatury nawierzchni dla analizowanego przedziału czasu przedstawiono w tabelicy 3.



Rys. 4. Przykłady rozkładu temperatury w nawierzchni dla obciążenia: a) KR4 i b) KR6 w chwili $t = 0$ s, warunek początkowy dla wariantu 1 (kruszywo magmowe), wyniki z analizy stacjonarnej
 Fig. 4. Examples of the temperature distribution in the pavement structure at $t = 0$ s for: a) medium traffic and b) very heavy traffic (magmatic aggregate), results of the stationary analysis

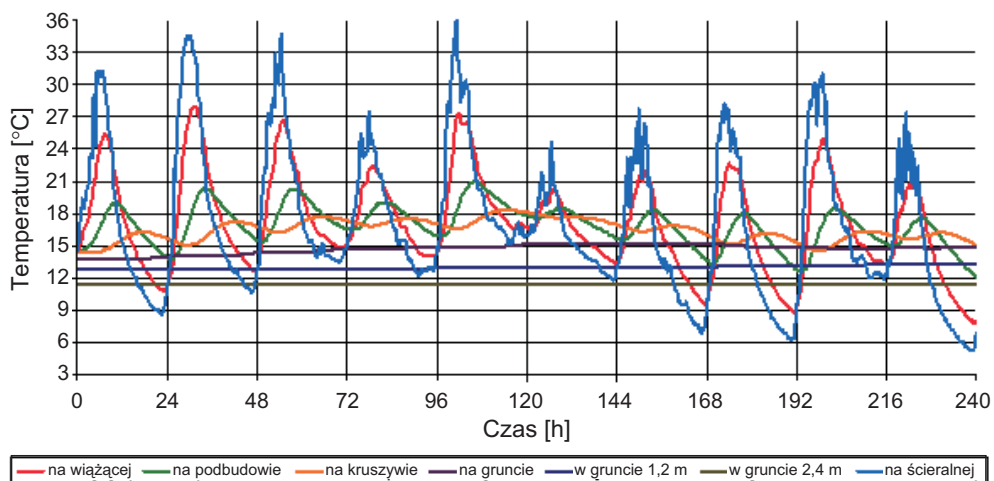


Rys. 5. Rozkłady temperatury w nawierzchni o grubości dla obciążenia KR4 w okresie 240 h na różnych głębokościach, wariant 1 (kruszywo magmowe)
 Fig. 5. Examples of the temperature distribution in the pavement structure for medium traffic for period of 240 h at different depths, variant 1 (magmatic aggregate)



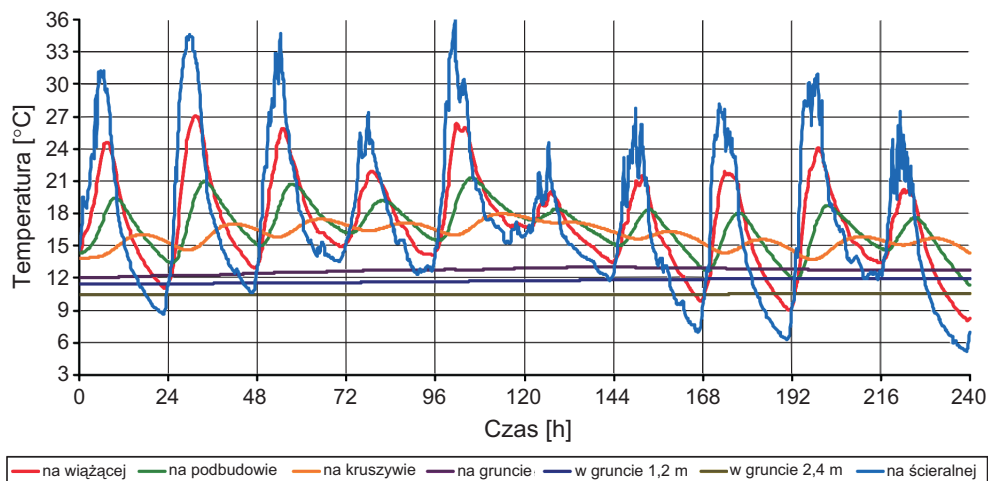
Rys. 6. Rozkłady temperatury w nawierzchni o grubości dla obciążenia KR4 w okresie 240 h na różnych głębokościach, wariant 2 (kruszywo węglanowe)

Fig. 6. Examples of the temperature distribution in the pavement structure for medium traffic for period of 240 h at different depths, variant 2 (carbonate aggregate)

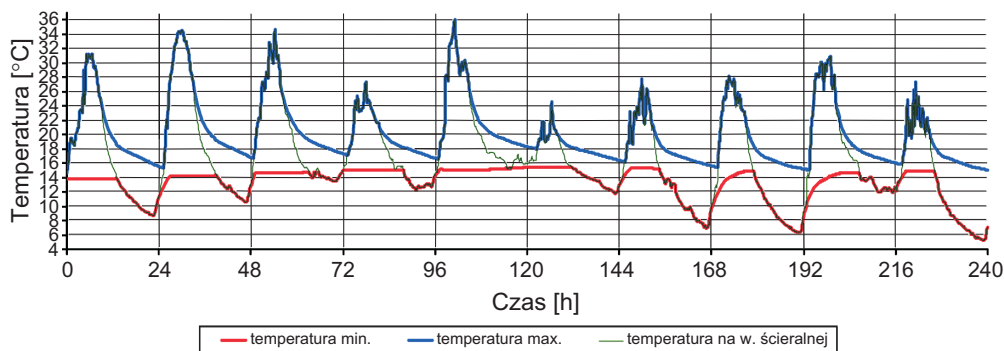


Rys. 7. Rozkłady temperatury w nawierzchni o grubości dla obciążenia KR6 w okresie 240 h na różnych głębokościach, wariant 3 (kruszywo magmowe - warstwa wiążąca i kruszywo węglanowe - warstwa podbudowy)

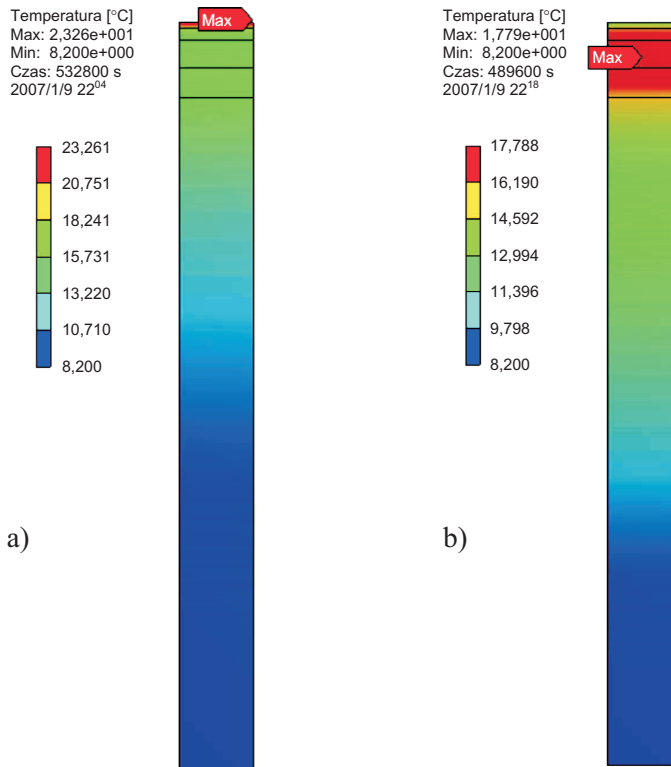
Fig. 7. Examples of the temperature distribution in the pavement structure for very heavy traffic for period of 240 h at different depths, variant 3 (magmatic aggregate - bonding layer, carbonate aggregate - base layer)



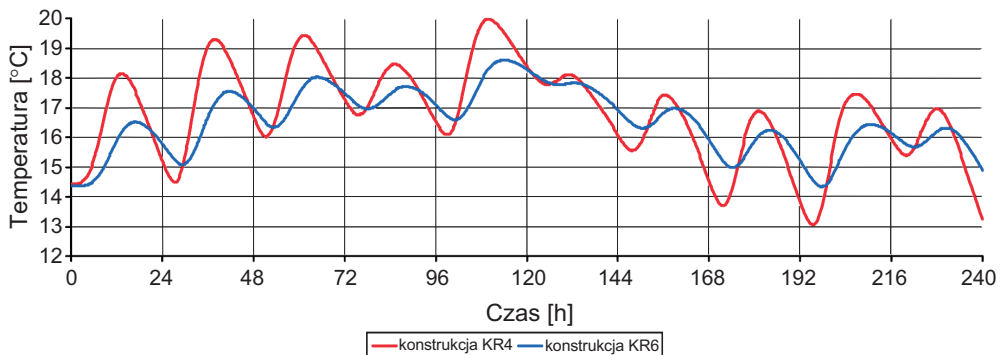
Rys. 8. Rozkłady temperatury w nawierzchni dla obciążenia KR6 w okresie 240 h na różnych głębokościach, wariant 5 (kruszywo magmowe i grunt: pospółka)
 Fig. 8. Example of the temperature distribution in the pavement structure for very heavy traffic for period of 240 h at different depths, variant 5 (magmatic aggregate, subgrade: gravel-sand)



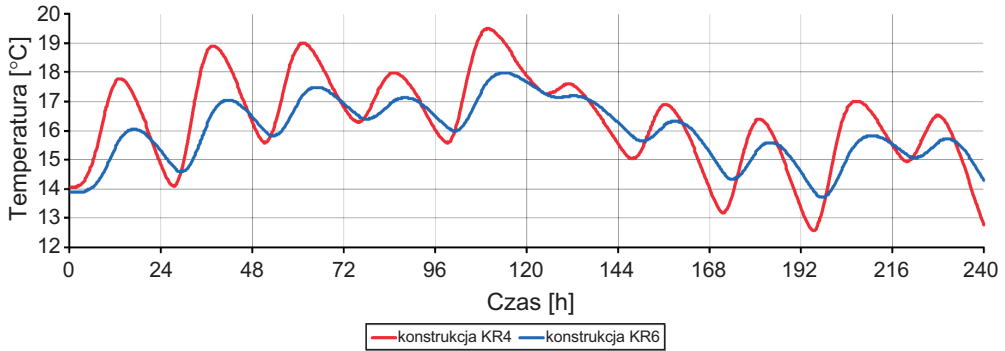
Rys. 9. Przebieg globalnych ekstremów temperatury min. i temperatury max. w konstrukcji nawierzchni o grubości dla KR4, wariant 2, w okresie 240 h – obwiednia temperatury
 Fig. 9. Changes of global extremes of temperature (min., max.) in the pavement structure for medium traffic for period of 240 h, variant 2 – the envelope of temperature



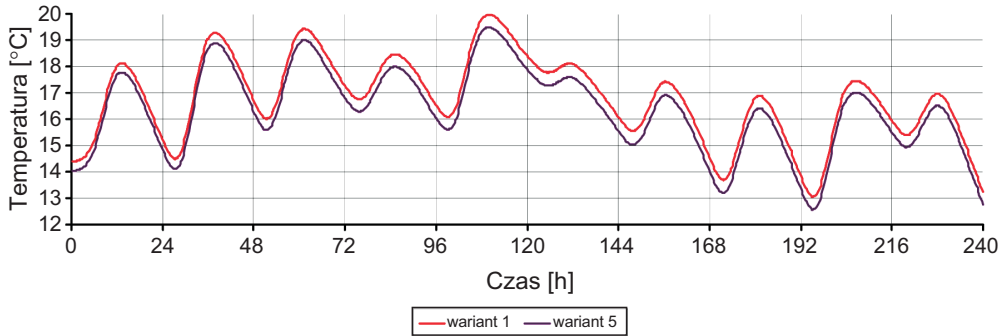
Rys. 10. Przykłady rozkładu temperatury w nawierzchni KR6 dla wybranej chwili: a) 532800 s - godz. 12⁰⁰ (południe), dn. 05.10.06, b) 489600 s - godz. 0⁰⁰ (północ), dn. 05.10.06, wariant 1 (kruszywo magmowe – warstwa wiążąca i warstwa podbudowy)
 Fig. 10. Examples of the temperature distribution in the pavement structure for very heavy traffic: a) at midday on 05.10.06, b) at midnight on 05.10.06, variant 1 (magmatic aggregate – bonding layer and base layer)



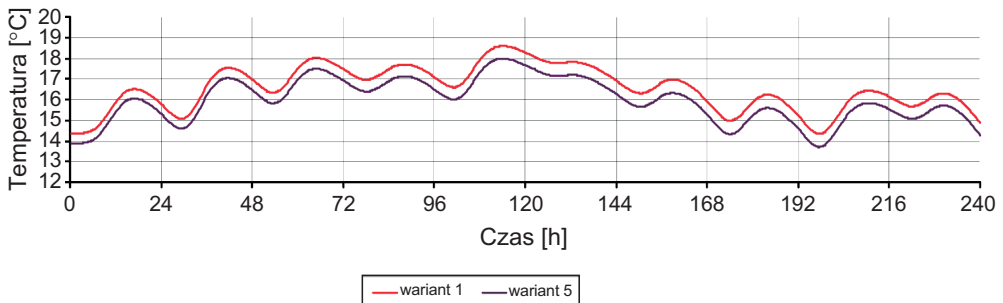
Rys. 11. Porównanie wykresów przebiegu temperatury na spodzie podbudowy asfaltowej dla konstrukcji nawierzchni o grubościach jak dla obciążenia KR4 i KR6, wariant 1
 Fig. 11. Comparison of the temperature - time histories at the bottom of the base layer in the asphalt structure for very heavy and medium traffic, variant 1



Rys. 12. Porównanie wykresów przebiegu temperatury na spodzie podbudowy asfaltowej dla konstrukcji nawierzchni o grubościach dla obciążenia KR4 i KR6, wariant 5
 Fig. 12. Comparison of the temperature - time histories at the bottom of the base layer in the asphalt structure for very heavy and medium traffic, variant 5



Rys. 13. Rozkład temperatury na głębokości 23 cm (spód podbudowy asfaltowej dla KR4), dla różnych rodzajów podłoża gruntowego, dla okresu 240 h – porównanie wariantów 1 i 5
 Fig. 13. Temperature distribution at a depth of 23 cm (at the bottom of the base layer for medium traffic) for different subgrades for period of 240 h – the comparison of variants 1 and 5



Rys. 14. Rozkład temperatury na głębokości 31 cm (spód podbudowy asfaltowej dla KR6), dla różnych rodzajów podłoża gruntowego, dla okresu 240 h – porównanie wariantów 1 i 5
 Fig. 14. Temperature distribution at the depth of 31 cm (at the bottom of the base layer for very heavy traffic) for different subgrades for period of 240 h – the comparison of variants 1 and 5

Tablica 3. Zestawienie wartości maksymalnych i minimalnych temperatury nawierzchni w analizowanym przedziale czasu, konstrukcja dla obciążenia KR4 i KR6
 Table 3. Values of minimum and maximum temperature of the asphalt structure during the analyzed period, the asphalt structure for medium traffic and very heavy traffic

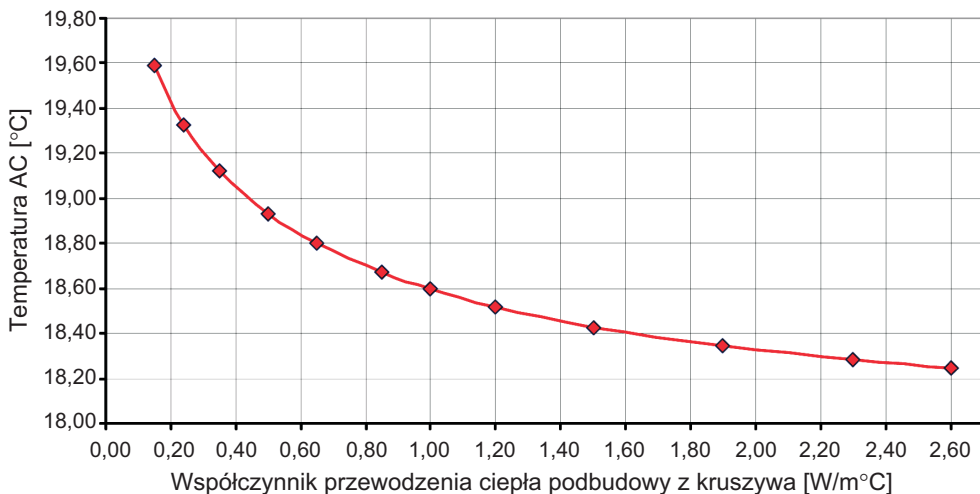
Wariant konstrukcji	Lokalizacja	Max temp. [°C] dla KR4	Min. temp. [°C] dla KR4	Δ temp. [°C] dla KR4	Max temp. [°C] dla KR6	Min. temp. [°C] dla KR6	Δ temp. [°C] dla KR6
1	na wiążącej	27,35	7,98	19,37	27,13	8,18	18,95
	na podbudowie	21,70	11,20	10,49	21,57	11,57	10,00
	na kruszywie	19,96	13,06	6,91	18,59	14,34	4,25
	na gruncie	15,63	13,82	1,81	15,36	13,76	1,61
	w gruncie 1,2 m	13,25	12,87	0,38	13,30	12,89	0,41
	w gruncie 2,4 m	11,40	11,39	0,01	11,42	11,41	0,01
2	na wiążącej	28,20	7,62	20,58	27,95	7,75	20,19
	na podbudowie	21,41	11,49	9,92	21,35	11,72	9,64
	na kruszywie	19,33	13,49	5,84	18,02	14,28	3,74
	na gruncie	15,46	13,78	1,69	15,16	13,69	1,47
	w gruncie 1,2 m	13,19	12,83	0,36	13,21	12,83	0,38
	w gruncie 2,4 m	11,37	11,37	0,01	11,38	11,37	0,01
3	na wiążącej	28,13	7,71	20,42	27,90	7,87	20,03
	na podbudowie	21,07	11,80	9,27	20,95	12,12	8,83
	na kruszywie	19,57	13,36	6,21	18,33	14,33	4,00
	na gruncie	15,54	13,80	1,74	15,28	13,74	1,55
	w gruncie 1,2 m	13,22	12,85	0,37	13,27	12,87	0,39
	w gruncie 2,4 m	11,39	11,38	0,01	11,41	11,40	0,01

Wariant konstrukcji	Lokalizacja	Max temp. [°C] dla KR4	Min. temp. [°C] dla KR4	Δ temp. [°C] dla KR4	Max temp. [°C] dla KR6	Min. temp. [°C] dla KR6	Δ temp. [°C] dla KR6
4	na wiążącej	27,46	7,87	19,59	27,21	8,03	19,18
	na podbudowie	22,07	10,90	11,17	21,99	11,15	10,84
	na kruszywie	19,69	13,22	6,47	18,24	14,30	3,94
	na gruncie	15,55	13,80	1,75	15,24	13,71	1,53
	w gruncie 1,2 m	13,22	12,84	0,37	13,24	12,85	0,39
	w gruncie 2,4 m	11,38	11,38	0,01	11,39	11,38	0,01
5	na wiążącej	27,26	7,89	19,37	27,03	8,08	18,95
	na podbudowie	21,42	10,94	10,48	21,32	11,31	10,01
	na kruszywie	19,48	12,58	6,90	17,98	13,71	4,27
	na gruncie	13,27	12,23	1,04	13,01	12,09	0,93
	w gruncie 1,2 m	11,99	11,54	0,45	11,92	11,48	0,44
	w gruncie 2,4 m	10,61	10,49	0,13	10,57	10,45	0,12

Im głębiej analizujemy temperaturę w nawierzchni tym większe różnice obserwuje się pomiędzy wariantami, stąd na rysunkach 11 ÷ 12 przedstawiono wykresy przebiegu temperatury na spodzie podbudowy asfaltowej, na głębokości 23 cm i 31 cm dla wybranych wariantów.

Dla większej czytelności wpływu rodzaju podłoża, na rysunkach 13 i 14 podano rozkład temperatury na spodzie podbudowy asfaltowej dla podłoża o niskim współczynniku przewodności ($\lambda = 0,58 \text{ W/K}\cdot\text{m}$, wariant 1), oraz podłoża o wysokim współczynniku przewodności ($\lambda = \text{W/K}\cdot\text{m}$, wariant 5).

Na rysunkach 15 i 16 zamieszczono wyniki z parametrycznej analizy konstrukcji dla jednego wariantu materiałowego nawierzchni, tj. określono zmianę maksymalnej temperatury z zadanego przedziału czasowego na spodzie podbudowy AC na zmianę współczynnika przewodności cieplnej warstwy podbudowy pomocniczej z kruszywa. Ze względu na dużą liczbę wyników przytoczono tylko przykład dla wariantu 2.

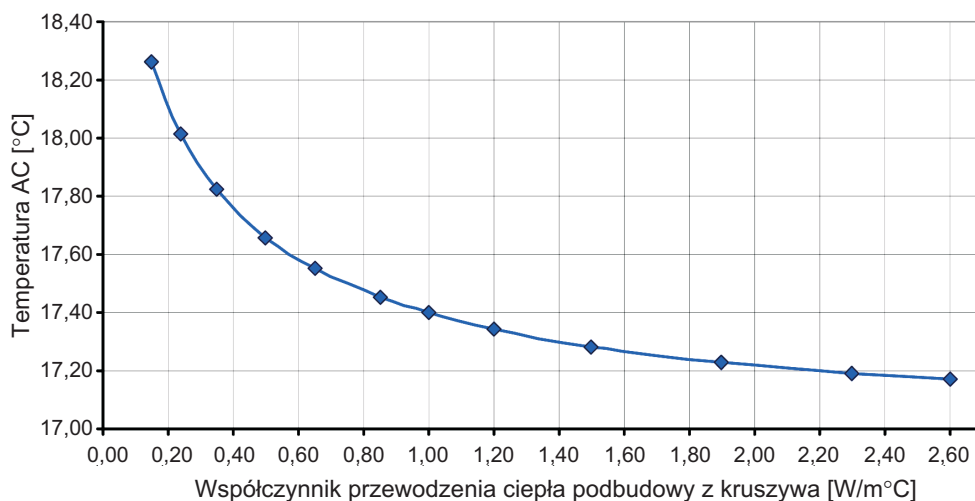


Rys. 15. Wpływ współczynnika przewodzenia ciepła w warstwie podbudowy pomocniczej na maksymalną temperaturę na spodzie podbudowy z AC w zadanym przedziale czasu; nawierzchnia o grubości dla obciążenia KR4, wariant 2

Fig. 15. Influence of thermal conductivity coefficient of the subbase layer on the maximum temperature at the bottom of the base layer for 240 h period; the asphalt structure for medium traffic, variant 2

4.3. WNIOSKI Z SYMULACJI KOMPUTEROWEJ ZJAWISKA PRZEWODZENIA CIEPŁA W ASFALTOWEJ NAWIERZCHNI DROGOWEJ

Przedstawione wnioski dotyczą badanego przedziału czasowego. Wnioski sformułowano na podstawie wykresów temperatury w nawierzchni, analiz statystycznych wartości temperatur na spodzie podbudowy asfaltowej dla różnych wariantów oraz wykresów wrażliwości temperatury na wybrane parametry.



Rys. 16. Wpływ współczynnika przewodzenia ciepła w warstwie podbudowy pomocniczej na maksymalną temperaturę na spodzie podbudowy z AC w zadanym przedziale czasu; nawierzchnia o grubości dla obciążenia KR6, wariant 2

Fig. 16. Influence of thermal conductivity coefficient of the subbase layer on the maximum temperature at the bottom of the base layer for 240 h period; the asphalt structure for very heavy traffic, variant 2

1. Na rozkład temperatury w nawierzchni wpływają decydująco następujące czynniki:
 - temperatura powierzchni jezdni jako wynik procesów konwekcji, radiacji i przewodzenia ciepła,
 - grubość warstw nawierzchni,
 - wartość współczynników przewodzenia ciepła materiałów konstrukcyjnych,
 - wartość współczynników przewodzenia ciepła podłoża gruntowego.
2. W przedstawionym przypadku temperatura powierzchni została zaczerpnięta do celów symulacji z rzeczywistych pomiarów [3]. Możliwe jest także jej wyznaczenie analityczne z procesów radiacji i konwekcji, przy nieodzownym uwzględnieniu jednak właściwości termicznych samej nawierzchni. Przy identycznych procesach radiacji i konwekcji temperatura powierzchni różnych nawierzchni będzie różna.
3. Z symulowanych danych dotyczących maksymalnych i minimalnych wartości temperatur można stwierdzić, że dla przyjętego warunku brzegowego w okresie obserwacji rozpatrywane konstrukcje nawierzchni pracowały w maksymalnym dobowym zakresie temperatur około 20 °C.
4. Im wyższy jest współczynnik przewodności cieplnej warstwy asfaltowej, tym grubość warstwy ma większy wpływ na jej temperaturę.

5. Różnice temperatury w analizowanych wariantach konstrukcyjnych (różne współczynniki przewodności cieplnej warstw asfaltowych) przeanalizowano dla tego samego podłoża, tj. wariantów 1÷4. I tak: na spodzie warstwy ścieralnej najwyższą dzienną temperaturę stwierdzono w wariacie 2, w którym warstwa ścieralna wykonana z MMA z kruszywem magmowym ułożona jest na warstwach MMA z kruszywem węglanowym; na spodzie warstwy wiążącej najwyższą dzienną temperaturę ma wariant 4, w którym warstwy ścieralna i wiążąca wykonane z kruszywem magmowym ułożone są na podbudowie z MMA z kruszywem węglanowym; na spodzie podbudowy asfaltowej najwyższą dzienną temperaturę zaobserwowano w wariacie 1, w którym wszystkie warstwy asfaltowe wykonane z MMA z kruszywem magmowym, a spoczywają na warstwie kruszywa żużłowego. Dla analizowanego okresu i przedziału czasowego nie są to różnice duże – nie przekraczają $1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, nie mniej potwierdzają istotną prawidłowość: układanie warstw o wyższym współczynniku przewodności cieplnej na warstwach o współczynniku niższym sprzyja kumulacji ciepła w górnych warstwach a tym samym sprzyja deformacjom trwałym.
6. W obu przypadkach grubości warstw (dla KR4 – 43 cm i dla KR6 – 51 cm), na głębokości 1,2 m od powierzchni jezdni w gruncie temperatura zaczyna się ustalać, przyjmując na głębokości 2,4 m wartość stałą.
7. Przy wyższym współczynniku przewodności cieplnej gruntu podłoża, temperatura na spodzie warstwy podbudowy z kruszywa żużłowego obniża się; w analizowanym przypadku spadek wynosi maksymalnie $2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$.
8. Jak wynika z rysunku 15 stosowanie w podbudowie z kruszywa materiału o wysokiej przewodności cieplnej (np. $\lambda=2,50\text{ W/K}\cdot\text{m}$), w porównaniu do kruszywa o niskiej przewodności cieplnej (np. $\lambda=0,24\text{ W/K}\cdot\text{m}$) powoduje spadek temperatury w warstwie AC (w analizowanym przypadku o $1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$). Zależność powyższą można także sformułować odwrotnie, tzn. zastosowanie w podbudowie pomocniczej kruszywa o niskim współczynniku przewodzenia ciepła powoduje wzrost temperatury w wyżej położonej warstwie podbudowy asfaltowej.

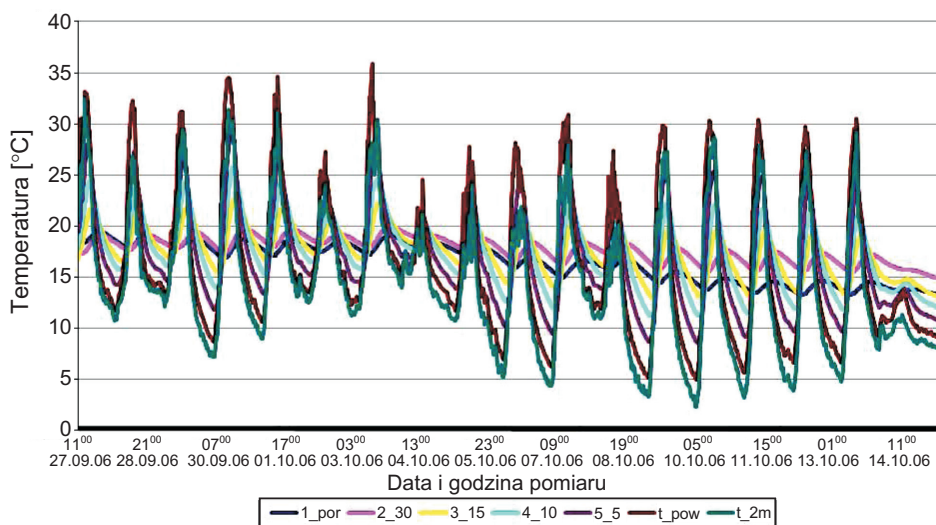
5. WERYFIKACJA WYNIKÓW SYMULACJI KOMPUTEROWEJ Z POMIARAMI POLOWYMI

5.1. UWAGI OGÓLNE

Aby sprawdzić poprawność zastosowanego podejścia podjęto próbę weryfikacji wyników symulacji poprzez porównanie z rzeczywistymi wartościami temperatur pomierzonymi na różnych głębokościach. Przeprowadzono cykl badań rzeczywistej temperatury w konstrukcji nawierzchni o układzie warstw zbliżonym do analizowanej konstrukcji dla KR4. Badania przeprowadzono na płycie postojowej Międzynarodowego Portu Lotniczego Kraków-Balice. Wybór miejsca podyktowany był w głównej mierze względami ochrony, całodobowego zabezpieczenia specjalistycznego sprzętu służącego do wykonywania pomiarów oraz ograniczeniem zacieniania powierzchni przez poruszające się pojazdy.

Pomiaru temperatury dokonano w okresie 27.09.2006÷15.10.2006. W płycie postojowej wywiercono 5 otworów o średnicy 1,8 cm i maksymalnej głębokości 30 cm. Do ścianek otworów, na odpowiednich głębokościach, przytwierdzono czujniki typu PT-100, służące do pomiaru temperatury. Czujniki umieszczono na głębokościach 5 cm, 10 cm, 15 cm, i dwa czujniki na głębokości 30 cm, w odległości 3 m względem siebie, w celu określenia powtarzalności i poprawności działania czujników. Następnie otwory wypełniono mączką wapienną i zabezpieczono przed działaniem zewnętrznych czynników atmosferycznych. Dodatkowo umieszczono jeden czujnik do pomiaru temperatury powietrza na wysokość 2 m ponad nawierzchnią. Czujniki podłączono do urządzenia, służącego do rejestrowania temperatury – ośmiokanałowego rejestratora typu KRT 198, który był bezpośrednio połączony z komputerem.

Dokładność wskazań czujnika wynosiła 0,1 °C. Rejestracja wskazań czujników odbywała się w sposób ciągły, natomiast zapis wyników pomiarów na dysku komputera następował co 15 minut. Zarejestrowany przebieg temperatury w nawierzchni, dla badanego okresu, przedstawiono na rysunku 17.



Rys. 17. Przebieg zmian temperatury – wskazania 7 czujników
Fig. 17. Time course of the temperature – reading of 7 sensors

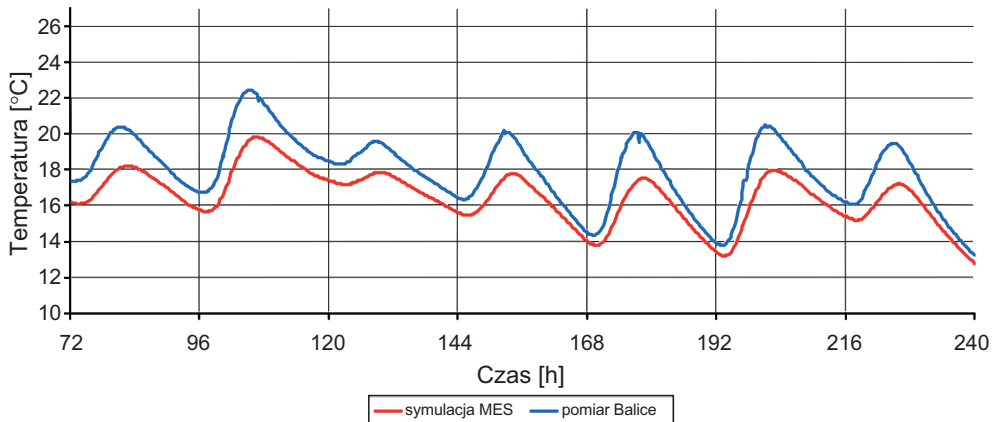
Krzywe pomiarowe oznaczone 1_por i 2_30 przedstawiają zmianę temperatury na głębokości 30 cm. Krzywe oznaczone numerami 3_15, 4_10, 5_5 obrazują przebieg temperatury na głębokościach odpowiednio 15 cm, 10 cm, 5 cm. Oznaczenie t_pow odnosi się do zarejestrowanych zmian temperatury na powierzchni konstrukcji. Oznaczenie t_2m pokazuje zmianę temperatury powietrza nad stanowiskiem badawczym na wysokości 2 m.

Analizując przebiegi zmian temperatury stwierdzono że:

- można rozróżnić porę dnia i nocy, które charakteryzują się przeciwnym zwrotem wektora strumienia ciepła – przemieszczanie się energii cieplnej na kierunku otoczenie - nawierzchnia,
- można zaobserwować również spadek temperatury wraz z głębokością oraz przesunięcie fazowe między poszczególnymi wykresami, związane z tzw. zjawiskiem bezwładności cieplnej,
- znaczne różnice między wykresami temperatur na głębokości 30 cm spowodowane zostały przez zacienienie obszaru nawierzchni, na którym zlokalizowany był czujnik porównawczy, oznaczenie 1_por. Od 30.09.2006 obok obszaru działania czujnika postawiono samochód ciężarowy, którego cień znacznie ograniczył dopływ ciepła przez radiację.

Analizę numeryczną jednowymiarowego zjawiska przewodzenia ciepła przeprowadzono używając elementów izoparametrycznych PLANE77 z biblioteki systemu ANSYS. Do dyskretyzacji czasu użyto kroku 900 sekund – okres zapisywania danych urządzenia pomiarowego. Zasymlowano przebieg temperatury dla głębokości 5 cm, 10 cm, 15 cm, 30 cm, tj. na głębokości umiejscowienia czujników pomiarowych.

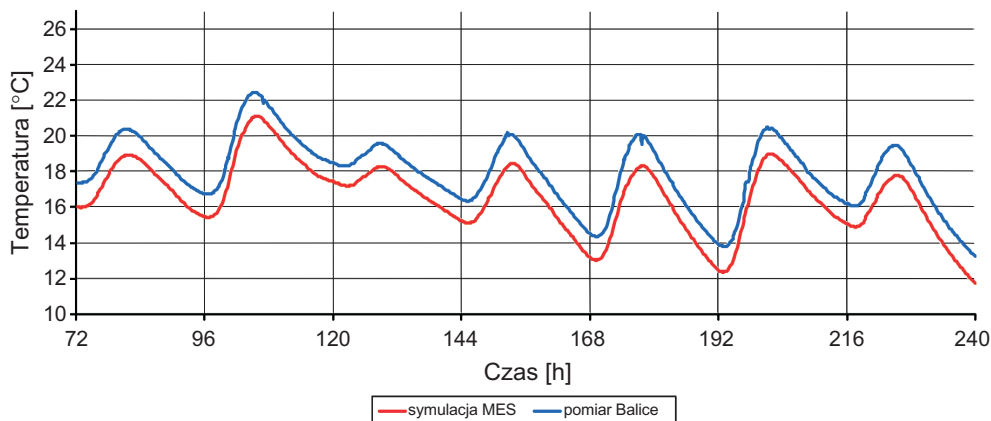
Przeprowadzone analizy wstępne wartości współczynników przewodności cieplnej otrzymanych z własnych badań laboratoryjnych wykazały znaczne rozbieżności (spowodowane prawdopodobnie różnicą składu mieszanek, zawilgoceniem w warunkach polowych), stąd do analiz porównawczych oprócz wartości z badań własnych dla warstw asfaltowych ($\lambda = 0,70 \text{ W/K}\cdot\text{m}$) przyjęto także wartości ($\lambda = 1,20 \text{ W/K}\cdot\text{m}$) odczytane z publikacji de Bondt'a [7]. Przeprowadzono więc analizy dla dwóch wariantów, różniących się współczynnikami przewodzenia ciepła i gęstością warstw asfaltowych.



Rys. 18. Wykresy porównawcze zmierzonej i obliczonej temperatury w nawierzchni asfaltowej płyty postojowej Międzynarodowego Portu Lotniczego Kraków-Balice; przedział czasowy 72 h - 240 h, głębokość 15 cm, wariant 1

Fig. 18. Comparison of measured and calculated temperature in time in the asphalt pavement for the apron of Krakow Airport for period of 72 h - 240 h at the depth of 15 cm, variant 1

Analizy porównawcze temperatury wykonano dla przedziału czasu od 72 h do 240 h, aby wyeliminować wpływ warunku początkowego na wyniki obliczeń MES. Przykładowo na rysunkach 18 i 19 podano wykresy porównawcze temperatury na głębokości 15 cm w przypadku wariantu 1 (przyjmując współczynniki z pomiarów własnych) i wariantu 2 (przyjmując współczynniki zaczerpnięte z literatury).



Rys. 19. Wykresy porównawcze przebiegu temperatury w nawierzchni asfaltowej płyty postojowej Międzynarodowego Portu Lotniczego Kraków-Balice; przedział czasowy 72 h - 240 h, głębokość 15 cm, wariant 2

Fig. 19. Comparison of measured and calculated temperature in time in the asphalt pavement for the apron of Krakow Airport for period of 72 h - 240 h at the depth of 15 cm, variant 2

5.2. WNIOSKI Z EMPIRYCZNEJ KONFRONTACJI WYNIKÓW

1. Przedstawione wykresy temperatury pochodzące z symulacji komputerowej na poszczególnych głębokościach, zarówno dla wariantu 1 jak i 2, wykazują przebiegi bardzo zbliżone do pomierzonych. Ponadto stwierdzono zgodność w czasie ekstremów lokalnych (brak przesunięcia fazowego dla wykresów).
2. Na głębokości 5 cm, krzywe wynikowe z analiz MES dla wariantu 1 wykazują mniejsze amplitudy od amplitud krzywych z badań polowych. Lepsze dopasowanie można uzyskać zwiększając współczynnik przewodzenia ciepła warstw asfaltowych (wariant 2). Na głębokościach 10 cm, 15 cm, 30 cm (wraz ze wzrostem głębokości) dodatkowo całe krzywe (dla rozpatrywanego przedziału czasu) pochodzące z symulacji komputerowej, dla wariantu 1, wykazują przesunięcie na kierunku osi rzędnych, w stronę niższych temperatur. Efekt ten można także zaobserwować dla wszystkich obliczonych krzywych z wariantu 2.
3. Spowodowane to może być zbyt niską temperaturą przyjętą na głębokości 5 m (warunek brzegowy), która została wyznaczona jako średnia temperatura powietrza tylko dla trzech wcześniejszych letnich miesięcy oraz brakiem danych z odwiertów o rzeczywistym gruncie, uwarstwieniu, rodzajach i stanu zawilgocenia materiałów wbudowanych w konstrukcję nawierzchni. Stałe materiałowe charakteryzujące własności termiczne poszczególnych warstw były przyjęte z literatury, a rodzaje i grubości warstw na podstawie projektu budowlanego.

4. Jako miary dopasowań krzywych obliczonych do pomierzonych przyjęto wartość bezwzględną z różnicy pomiędzy temperaturą rzeczywistą i z symulacji dla analizowanego przedziału czasu. Lepsze dopasowanie osiąga się dla wyższych współczynników przewodności cieplnej warstw asfaltowych (wariant 2). W przypadku niższych wartości współczynników (z badań własnych) maksymalna różnica temperatury na spodzie warstw asfaltowych wynosi 2,98 °C (średnia wartość 1,41 °C), a przy wartości współczynników przyjętych wg de Bondt'a [7] różnica maksymalna wynosi 1,98 °C (różnica średnia 1,33 °C).

6. WNIOSKI KOŃCOWE

1. Wykazano, że model przewodnictwa cieplnego Fouriera-Kirchhoffa dobrze opisuje zjawisko przewodzenia ciepła w wielowarstwowej konstrukcji nawierzchni i jego sformułowanie w MES może być stosowane do wyznaczania rozkładu temperatury. Jak wynika z konfrontacji rozkładu symulowanego w systemie ANSYS z rozkładem rzeczywistym, zgodność jest dobra, szczególnie dla współczynników przewodności cieplnej mieszanek asfaltowych przyjętych jako nieco wyższe w stosunku do wartości określonych z badań własnych.
2. Wykresy temperatury pochodzące z symulacji komputerowej na poszczególnych głębokościach mają przebiegi bardzo zbliżone do pomierzonych. Ponadto stwierdzono zgodność w czasie ekstremów lokalnych (brak przesunięcia fazowego dla wykresów).
3. W asfaltowej nawierzchni drogowej występują trzy rodzaje procesów cieplnych (konwekcja, radiacja, kondukcja), co prowadzi do zmian rozkładu temperatury na głębokości konstrukcji zarówno w okresie dobowym jak i rocznym. Model fizyczny opisujący zjawiska konwekcji i radiacji [1], pozwalający na wyznaczanie temperatury górnej warstwy nawierzchni asfaltowej, nie uwzględnienia właściwości termicznych samej konstrukcji. Przy pewnych założeniach, możliwe jest wyznaczenie temperatury górnej powierzchni asfaltowej nawierzchni drogowej, która może być potraktowana jako warunek brzegowy do dalszych analiz.
4. Przeprowadzone pomiary współczynników przewodności cieplnej λ dla różnych mieszanek asfaltowych wykazały, że otrzymane wartości są stosunkowo niskie i nie różnią się istotnie od siebie. Większa zawartość asfaltu w SMA wpływa na nieco niższą wartość współczynnika λ w porównaniu do betonu asfaltowego. Mieszanki na podbudowę z kruszywem magmowym mają wartość współczynnika λ wyższą od mieszanek z kruszywem węglanowym. Zaobserwowano znaczne różnice pomiędzy wynikami z pomiarów własnych a danymi zestawionymi z literatury. Wysoka wartość współczynnika $\lambda = 2,50 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ podana przez Hermansson'a [2] może być związana ze specyfiką mieszanek asfaltowych w Szwecji. Stosunkowo mniejsze różnice występują pomiędzy wartościami λ dla betonu asfaltowego pomierzonymi w badaniach własnych, odczytanymi z normy [9] oraz podanymi przez de Bondt'a [7]. W procedurach weryfikacyjnych zastosowano wartości współczynników z badań własnych oraz dla porównania wartość $\lambda = 1,20 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, zaczerpniętą z pracy [7].

5. Lepsze dopasowanie można uzyskać zwiększając współczynnik przewodzenia ciepła warstw asfaltowych (wariant 2). W przypadku niższych wartości współczynników (z badań własnych) maksymalna różnica temperatur na spodzie warstw asfaltowych wynosi 2,98 °C (średnia wartość 1,41 °C). W przypadku wartości współczynników przyjętych wg de Bondt'a różnica maksymalna wynosi 1,98 °C (różnica średnia 1,33 °C). Prawdopodobnie jeszcze lepsze dopasowanie można osiągnąć przyjmując dane zawarte w [10].

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Mieczkowski P.*: Model fizyczny obliczania temperatury górnej warstwy nawierzchni asfaltowej. *Drognictwo* nr 8/2001, 230 - 235
- [2] *Hermansson A.*: Simulation of asphalt concrete pavement temperatures for use with forward – opracowanie J. Sudyki. IBDiM, Nowości Zagranicznej Techniki Drogowej nr 155/2004, 5 - 19
- [3] *Grzybowska W., Górszczyk J., Zieliński P.*: Projekt badawczy Nr 4TO7E 013 28 „Modelowanie zachowania się bitumicznej nawierzchni drogowej w różnych warunkach kontaktu międzywarstwowego z uwzględnieniem pośredniej warstwy geosyntetycznej”, finansowany przez Ministerstwo Nauki i Informatyki w latach 2005-2007
- [4] *Wiśniewski S., Wiśniewski T.S.*: Wymiana ciepła. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, IV edition, Warszawa, 1994
- [5] *Groth C., Müller G.*: FEM für Praktiker, Band 3 Temperaturfelder. Expert Verlag, 71272 Renningen, 1995
- [6] Katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych. IBDiM, Warszawa, 1997
- [7] *de Bondt A.H.*: Anti-Reflective Cracking Design of (Reinforced) Asphaltic Overlays. Delft University of Technology, the Netherlands, 1999
- [8] *Sybilski D., Bańkowski W.*: Temperatura równoważna nawierzchni asfaltowej ze względu na zmęczenie w polskich warunkach klimatycznych. *Drognictwo* nr 6/2004, 179 - 184
- [9] DIN 4108 Wärmeschutz im Hochbau
- [10] *Müller R., Pirskawetz S., Weise F.*: Einfluss der Wärmeabstrahlung, -leitfähigkeit und -kapazität von Mineralstoffen auf die Energiebilanz von Fahrbahnbefestigungen. *Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik*, Heft 968, Köln, 2007

INFORMACJE DODATKOWE

Badania przeprowadzono w ramach projektu badawczego Nr 4TO7E 013 28 „Modelowanie zachowania się bitumicznej nawierzchni drogowej w różnych warunkach kontaktu międzywarstwowego z uwzględnieniem pośredniej warstwy geosyntetycznej”, zrealizowanego w Katedrze Budowy Dróg i Inżynierii Ruchu Politechniki Krakowskiej w latach 2005 - 2007.

THE USE OF FEM FOR THERMAL ANALYSES OF THE ASPHALT PAVEMENT

Abstract

The work concerns the transient heat flow in the pavement structure, for medium and heavy traffic. For both pavement structures the 5 variants with different heat conductivity coefficients were analyzed. The same boundary conditions were assumed.

The temperature distribution in the pavement structure for the initial moment was calculated using the stationary analyses with the defined border conditions, on the basis of real temperature measurements carried out in Cracow in 2006 year. The heat flow defined with Fourier-Kirchhoff equation was analyzed with finite element method using ANSYS system and Multiphysics modulus. One-way heat conductivity, material uniformity and isotropy was assumed. The analysis was performed for different variants of structural layers and the temperature sensibility for chosen parameters. Comparison of temperature distribution that was calculated with measured temperature in actual airport pavement revealed good fitting so the correctness of the applied approach was confirmed.

Keywords

Asphalt pavement, finite element method, heat conduction, temperature