



PARTH PANCHMATIA¹⁾
 MICHAŁ A. GLINICKI²⁾
 JAN OLEK³⁾

INFLUENCE OF MIXTURE COMPOSITION ON THERMAL PROPERTIES OF CONCRETE AND THE PERFORMANCE OF RIGID PAVEMENTS

WPŁYW SKŁADU MIESZANKI NA WŁAŚCIWOŚCI TERMICZNE BETONU ORAZ PARAMETRY FUNKCJONALNE NAWIERZCHNI SZTYWNYCH

STRESZCZENIE. W najnowszym podręczniku mechanistyczno-empirycznego projektowania nawierzchni drogowych (MEPDG) przy analizie i projektowaniu nawierzchni sztywnych większy nacisk położono na uwzględnienie naprężeń wywołanych termicznym pęceniem się płyt betonowych. Skład mieszanki betonowej ma duży wpływ na parametry termiczne betonu, takie jak współczynnik przewodzenia ciepła, współczynnik rozszerzalności cieplnej oraz ciepło właściwe. W dużym stopniu zależą one od rodzaju i zawartości kruszywa. W stanie wilgotnym beton charakteryzuje się wyższym ciepłem właściwym oraz współczynnikiem przewodzenia ciepła. W artykule omówiono wpływ składu mieszanki na właściwości termiczne betonu stwardniałego, a także na właściwości w początkowym okresie twardnienia. Omówiono również wpływ, jaki na funkcjonalność nawierzchni sztywnych mają sezonowe i dobowe zmiany temperatury. W przypadku nawierzchni lotniskowych cykliczne oddziaływanie gorących spalin wyrzucanych przez silniki odrzutowe powoduje powstawanie mikrospękań, zwiększenie wielkości porów oraz pogorszenie wytrzymałości na ściskanie i na rozciąganie przy zginaniu. Beton poddawany cyklicznemu oddziaływaniu podwyższonej temperatury podlega niszczeniu, którego widoczne skutki przypominają skutki naprzemiennego zamrażania i rozmrażania.

SŁOWA KLUCZOWE: gradient temperatury, nawierzchnia betonowa, parametry termiczne, współczynnik przewodzenia ciepła, współczynnik rozszerzalności cieplnej.

ABSTRACT. The recent mechanistic-empirical pavement design guide (MEPDG) put more emphasis on the effects of thermal curling stresses on rigid pavement analysis and design. Mix design of concrete has significant influence on its thermal properties such as thermal conductivity, coefficient of thermal expansion, and specific heat. Aggregate type and content significantly alter the thermal properties of concrete incorporating them. The moisture state of the concrete increases its specific heat and thermal conductivity. A review of the effect of temperature of fresh concrete on early age properties is also presented. The performance of rigid pavements exposed to seasonal and daily fluctuations in temperature is discussed. Airfield concrete pavements which are subjected to jet engine exhausts experience heat cycles micro-cracking, coarsening of microstructure and loss of compressive and flexural strength. These effects are mostly the result of the dehydration and decomposition of paste matrix in concrete. Heat cycles result in concrete deterioration similar in appearance to freezing and thawing deterioration.

KEYWORDS: coefficient of thermal expansion, temperature gradient, thermal conductivity, thermal properties, concrete pavement.

¹⁾ Purdue University, School of Civil Engineering, West Lafayette, IN, USA; ppanchma@purdue.edu (✉)

²⁾ Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, Warszawa; mglinic@ippt.pan.pl

³⁾ Purdue University, School of Civil Engineering, West Lafayette, IN, USA; olek@purdue.edu

1. WSTĘP

Wśród czynników mających wpływ na właściwości użytkowe nawierzchni betonowych wymienia się obciążenie ruchem, układ konstrukcyjny, technologię wykonania, skład mieszanki betonowej i zastosowane materiały oraz warunki otoczenia. Właściwości betonu nawierzchniowego stanowiące podstawę projektowania wyznacza się zazwyczaj w warunkach laboratoryjnych w warunkach kontrolowanej temperatury w zakresie 18-20°C. W warunkach eksploatacyjnych nawierzchnie betonowe są jednak narażone na oddziaływanie temperatury w szerokim zakresie oraz powstawanie gradientów temperatury. W takiej sytuacji bardzo ważne jest poznanie wpływu temperatury na właściwości betonu.

Tematem niniejszego artykułu jest wpływ składu mieszanki betonowej na właściwości termiczne stwardniałego betonu i w konsekwencji na właściwości funkcjonalne nawierzchni betonowych, narażonych na sezonowe i dobowe wahania temperatury. W podręczniku projektowania nawierzchni wydany przez AASHTO w 1986 roku [1] zwrócono uwagę na fakt, że różnica temperatury pomiędzy górną i dolną powierzchnią płyty betonowej powoduje wyginanie jej brzegów, czego wynikiem są uszkodzenia nawierzchni. Aby uwzględnić naprężenia wywołane paczeniem płyt w modelach obliczeniowych powszechnie przyjmowano liniowy rozkład temperatury wzdłuż konstrukcji grubości płyty nawierzchni. Przy analizie i projektowaniu nawierzchni według podręcznika mechanistyczno-empirycznego projektowania nawierzchni drogowych (MEPDG) [2] większy nacisk kładzie się na ujęcie wpływu naprężeń wywołanych termicznym paczeniem się płyt betonowych, co wywołuje duże zainteresowanie zagadnieniami wpływu wahań temperatury na właściwości eksploatacyjne nawierzchni. W przypadku płyt nawierzchni betonowych o dosyć dużej grubości, sięgającej nawet 38 cm, trzeba zwrócić więcej uwagi na wpływ różnicy temperatury między górą a spodem płyty. Znajomość właściwości termicznych betonu, takich jak współczynnik przewodzenia ciepła, pojemność cieplna oraz współczynnik rozszerzalności cieplnej jest przydatna przy wyznaczaniu gradientów temperatury oraz naprężeń powstających w przekroju nawierzchni w wyniku paczenia. Dlatego przy projektowaniu nawierzchni metodą mechanistyczno-empiryczną [2] właściwości te wykorzystuje się jako parametry wejściowe do analizy. Wpływ proporcji składników mieszanki na właściwości użytkowe betonu podlegającego obciążeniom termicznym wynika z różnych właściwości termicznych kruszyw i matrycy cementowej. Przykładowo, dużo niższa wartość współczynnika roz-

1. INTRODUCTION

The functional performance of concrete pavements is impacted by traffic, design, construction practices, mixture composition and materials, and environment. The engineering properties of pavement concrete are usually determined in laboratory with controlled temperatures within a narrow range of 18-20°C. In practice, however, concrete pavements are exposed to much broader temperature range and to thermal gradients. Therefore, the knowledge of the effects of temperature on properties of concrete is very important.

This paper focuses on the influence of mixture design on thermal properties of concrete and, ultimately, on the effects of seasonal and diurnal temperature fluctuations on the performance of concrete pavements. In 1986, the AASHTO pavement design guide [1] recognized that temperature differential between top and bottom surface of the slab created an upward curling, which resulted in structural deterioration of the pavement. To account for the curling stresses, linear temperature distribution across the pavement depth was commonly assumed in calculation models. The recent mechanistic-empirical pavement design guide (MEPDG) [2] put more emphasis on the effects of curling stresses on pavement design and analysis and therefore generated significant interest in evaluating the effects of temperature fluctuations on pavement performance. Concrete pavements as thick as 15 inches are not uncommon and therefore the temperature difference between the top and the bottom of the pavement has become even more important for pavement designers. The knowledge of thermal properties of concrete, such as thermal conductivity, heat capacity, and coefficient of thermal expansion, can help to predict the temperature gradients and curling stress across pavement cross sections. As a result, these properties are used as input parameters for the design of pavements in mechanistic-empirical pavement design [2]. Due to differences between thermal properties of various aggregates and hardened cement paste, the mixture proportions will influence the performance of concrete when exposed to temperature loading. For example, if the coefficient of thermal expansion of aggregates is much lower than that of paste surrounding the aggregate, the aggregates will restrict the contraction of paste during cooling cycle resulting in weakening of the interfacial transition zone and maybe de-bonding of the aggregates.

The reviews of basic parameters influencing thermal properties of concrete and a brief description of associated test methods are provided in section 2 of the paper. This is followed by the review of effects of temperature (other than

szerzalności cieplnej kruszywa w porównaniu do otaczającej go matrycy cementowej oznacza, że szkielet kruszywa będzie hamował skurcz matrycy w przypadku spadku temperatury, prowadząc do osłabienia warstwy kontaktowej, a nawet odspojenia ziaren kruszywa.

Rozdział 2 niniejszego artykułu zawiera omówienie głównych parametrów decydujących o właściwościach termicznych betonu oraz skrótowy opis metod badawczych wykorzystywanych do ich wyznaczania. W dalszej części przedstawiono wpływ temperatury (innej niż temperatura pokojowa) na właściwości układanej mieszanki oraz stwardniałego betonu. Omówiono wpływ doboru materiałów oraz ich zawartości w mieszance na właściwości termiczne betonu. Opisano powstawanie gradientów temperatury i naprężeń wywołanych páczeniem się betonowych płyt nawierzchni. W końcowej części przedstawiono zagadnienia cyklicznego oddziaływania wysokiej temperatury na wytrzymałość i trwałość nawierzchni lotniskowych.

2. WŁAŚCIWOŚCI TERMICZNE BETONU

2.1. PRZEWODNOŚĆ CIEPLNA

Aby prawidłowo przewidzieć reakcję nawierzchni betonowych na czynniki termiczne, niezbędne jest uwzględnienie właściwości termicznych samego materiału. W niniejszym rozdziale skrótowo omówiono przewodność cieplną, współczynnik rozszerzalności cieplnej i pojemność cieplną betonu oraz wydzielanie ciepła w procesie hydratacji.

Przewodność cieplna jest miarą zdolności materiału do przekazywania ciepła. W układzie SI wartość współczynnika przewodzenia ciepła wyraża się w watach na metr i kelwin (W/m·K). Odwrotnością przewodności cieplnej jest opór cieplny, określający zdolność materiału do powstrzymywania przepływu ciepła. Wartość oporu cieplnego wyznaczyć można korzystając ze wzoru wynikającego z prawa Fouriera, zgodnie z którym ilość ciepła przepływającego przez materiał w jednostce czasu jest proporcjonalna do ujemnego gradientu temperatury oraz powierzchni przepływu ciepła. Uproszczoną postać równania Fouriera można wykorzystać do obliczania natężenia przepływu ciepła między dwoma punktami jednorodnego materiału o stałych temperaturach:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x}, \quad (1)$$

gdzie:

room temperature) of fresh concrete on its fluid and hardened properties. Next, the effects of the type of concrete making materials and their relative proportions in the mixture on the thermal properties of concrete are discussed. This is followed by the description of the development of thermal gradients and curling stresses in concrete pavement slabs. Finally, the findings of a study to evaluate the effects of heat cycles on strength and durability of airfield concrete pavements are presented.

2. THERMAL PROPERTIES OF CONCRETE

2.1. THERMAL CONDUCTIVITY

To properly characterize the behavior of concrete pavements under thermal stimulus, it is essential to account for various thermal properties of concrete itself. This section presents a brief review of the following thermal characteristics of concrete: thermal conductivity, coefficient of thermal expansion, and heat capacity and development of heat during the hydration process.

Thermal conductivity is a measure of the material's ability to conduct heat. In SI units, it is expressed in watts per meter per kelvin (W/m·K). Thermal resistance, which is defined as the ability to resist flow of heat, is the reciprocal of thermal conductivity. Fourier's law, which states that the time rate of heat transfer through a material is proportional to the negative gradient of the temperature and to the area through which the heat flows, can be used to calculate thermal conductivity. A simplified form of Fourier's equation to calculate the heat flow rate between 2 points maintained at constant temperatures for a homogeneous material is presented in Equation 1:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x}, \quad (1)$$

where:

$\frac{Q}{\Delta t}$ – the heat flow rate [W],

k – the thermal conductivity [W/m·K],

A – the cross sectional area [m²],

$\frac{\Delta T}{\Delta x}$ – the temperature gradient in the direction of heat flow [K/m].

Concrete with higher thermal conductivity will transmit heat faster, resulting in lower temperature gradients across

$\frac{Q}{\Delta t}$ – natężenie przepływu ciepła [W],
 k – współczynnik przewodzenia ciepła [W/m·K],
 A – powierzchnia przekroju poprzecznego [m²],
 $\frac{\Delta T}{\Delta x}$ – gradient temperatury w kierunku przepływu ciepła [K/m].

Wyższa wartość współczynnika przewodzenia ciepła oznacza szybsze przekazywanie ciepła przez materiał taki, jak płyta betonowej nawierzchni, co skutkuje niższym gradientem temperatury w kierunku grubości płyty. Pomiar przepływu ciepła przez beton przeprowadzić można korzystając z procedury opisanej w normie ASTM C177-13 [3] za pomocą aparatu płytowego z osłoniętą płytą grzejną. Wartość współczynnika przewodzenia ciepła k można następnie obliczyć podstawiając uzyskane wartości natężenia przepływu ciepła do równania zawartego w normie ASTM C1045-07 [4] wzór (2a).

$$k = \frac{Q \cdot L_{avg}}{2A \cdot \Delta T_{avg}}, \quad (2a)$$

gdzie: Q – natężenie przepływu ciepła [W], L_{avg} – średnia grubość próbek, A – powierzchnia przekroju poprzecznego próbki w kierunku prostopadłym do kierunku strumienia ciepła [m²], ΔT_{avg} – średnia różnica temperatury [K].

Współczynnik przewodzenia ciepła przez beton można wyznaczyć przy wykorzystaniu miernika natężenia przepływu ciepła, stosując procedurę opisaną w normie ASTM C518-10 [5], zgodnie z którą współczynnik przewodzenia ciepła k nieznaney próbki oblicza się pośrednio przez oszacowanie stałej S dla danego układu na podstawie badań przeprowadzonych na materiale o znanej przewodności cieplnej. Zależność wykorzystywaną do obliczania współczynnika przewodzenia ciepła przedstawia wzór (2b).

$$k = SE \frac{L}{\Delta T}, \quad (2b)$$

gdzie: E – odczyt z przetwornika strumienia ciepła, L – grubość próbki, ΔT – różnica temperatury między ogrzewanym i zimnym końcem próbki. Wartość współczynnika przewodzenia ciepła betonu przyjmuje się typowo w przedziale 0,1-3,5 W/m·K.

Koncepcja procedury zawarta w normie ASTM E1530-11 [6] jest zgodna z procedurą ASTM C518-10 [5], a różnica między nimi polega na modyfikacji umożliwiającej wykorzystanie mniejszych próbek oraz większej odtwarzalności wyników w badaniach oporu cieplnego stykających się powierzchni. Współczynnik przewodzenia ciepła można również wyznaczyć metodą temperaturowo modulowanej różnicowej kalorymetrii skaningowej (TMDSC), korzystając z procedury przedstawionej w normie ASTM E1952-11 [7].

the thickness of pavements slabs. Guarded hot plate apparatus can be used to measure heat flow rate through concrete following the procedure described in ASTM C177-13 [3]. Equation presented in ASTM C1045-07 [4] (Equation 2a) can be used to calculate the thermal conductivity k given the values of heat flow rate.

$$k = \frac{Q \cdot L_{avg}}{2A \cdot \Delta T_{avg}}, \quad (2a)$$

where Q is heat flow rate [W], L_{avg} is the mean of the two specimen thicknesses L , A is the specimen area normal to the heat flux direction [m²] and ΔT_{avg} is the mean temperature difference [K].

Thermal conductivity of concrete can be measured using a heat flow meter apparatus following the procedure described in ASTM C518-10 [5] according to which the thermal conductivity k of unknown sample is indirectly calculated by estimating the constant S for the set up by testing substance with known conductivity. Equation (2b) shows the relationship used to calculate the thermal conductivity.

$$k = SE \frac{L}{\Delta T}, \quad (2b)$$

where: E is the output of the heat flux transducer, L is the thickness of the sample, and ΔT is the temperature differential between hot and cold ends of the sample. Generally, concrete has a thermal conductivity ranging of 0.1 to 3.5 W/m·K.

The procedure described in ASTM E1530-11 [6] is similar in concept to that of ASTM C518-10 [5] but is modified to include smaller test specimens and ensure better reproducibility of the thermal resistance of contacting surfaces. The procedure to determine the thermal conductivity using modulated temperature differential scanning calorimetry is described in ASTM E1952-11 [7]. However, this method is specified for determining the thermal conductivity of homogenous, non-porous solids and therefore would likely result in errors if employed for determining the thermal conductivity of concrete.

2.2. COEFFICIENT OF THERMAL EXPANSION (CTE)

On heating, matter has a tendency to increase in volume, owing to greater average separation between atoms. This increase in volume, if significant, could result in development of critical stresses in restrained structures. The CTE describes how the size of an object changes with a change in its temperature. The degree of expansion divided by the change in temperature gives a measure of the material's CTE.

Metoda ta została jednak przewidziana do wyznaczania przewodności cieplnej jednorodnych i nieporowatych ciał stałych, dlatego wyznaczone przy jej użyciu wartości współczynnika przewodzenia ciepła betonu będą prawdopodobnie obciążone błędem.

2.2. WSPÓŁCZYNNIK ROZSZERZALNOŚCI CIEPLNEJ

Ogrzewanie materiału powoduje typowo zwiększenie jego objętości, co wynika ze zwiększenia średniej odległości między atomami. W przypadku konstrukcji ograniczonych przestrzennie znaczne zwiększenie objętości może skutkować powstawaniem znacznych naprężeń. Miarą przyrostu objętości wskutek zmiany temperatury jest współczynnik rozszerzalności cieplnej α . Wartość współczynnika rozszerzalności cieplnej uzyskuje się dzieląc wartość będącą miarą rozszerzenia materiału przez różnicę temperatury. Gdy miarą rozszerzenia jest objętość, mówimy o współczynniku rozszerzalności objętościowej α_v . Analogicznie, współczynnik rozszerzalności liniowej α_L określa zmianę długości na jeden stopień zmiany temperatury. W przypadku materiałów rozszerzających się równomiernie we wszystkich kierunkach (czyli izotropowych), takich jak np. aluminium i stal, współczynnik rozszerzalności objętościowej jest trzykrotnie większy od współczynnika rozszerzalności liniowej. W przypadku betonu współczynnik rozszerzalności cieplnej zależy w dużej mierze od składu betonu, przy czym na poziomie mikrostruktury nie można ustalić jednoznacznej zależności między współczynnikami liniowym a objętościowym. Na poziomie makroskopowym beton można jednak traktować jako materiał izotropowy. W przypadku niewielkich zmian temperatury zmiany wymiarów liniowych lub objętości ciała stałego można obliczyć korzystając ze wzoru (3):

$$\frac{\Delta L}{L} = \alpha_L \Delta T, \quad (3a)$$

$$\frac{\Delta V}{V} = \alpha_v \Delta T. \quad (3b)$$

Odształcenie wywołane oddziaływaniem temperatury $\varepsilon_{thermal}$ na obiekt skrępowany jednokierunkowo obliczyć można korzystając ze wzoru (4):

$$\varepsilon_{thermal} = \alpha_L \Delta T. \quad (4)$$

Przyjmuje się, że beton charakteryzuje się współczynnikiem rozszerzalności cieplnej liniowej w przedziale $5-15 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Współczynnik rozszerzalności cieplnej betonów wyznaczyć można korzystając z metod przedstawionych w normach AASHTO T366-11 [8] i AASHTO TP60-00 [9]. Obie normy przedstawiają identyczną procedurę, zgodnie z którą współczynnik rozszerzalności cieplnej

Volumetric CTE (α_v) measures the change in volume per degree change in temperature. Similarly, linear CTE (α_L) measures the change in length per degree change in temperature. The volumetric CTE for materials such as aluminum and steel, which expand equally in all directions (known as isotropic materials), is three times their linear CTE. The CTE of concrete relies significantly on the composition of the mixture and there exists no fixed relation between linear and volumetric CTE at microscopic level. However, concrete is usually considered to be isotropic at macroscopic level. For small changes in temperature, the change in linear or volumetric dimensions of a solid can be calculated using Equation 3:

$$\frac{\Delta L}{L} = \alpha_L \Delta T, \quad (3a)$$

$$\frac{\Delta V}{V} = \alpha_v \Delta T. \quad (3b)$$

The strain $\varepsilon_{thermal}$ developed due to thermal stimulus for an object restrained in one direction is given by Equation 4:

$$\varepsilon_{thermal} = \alpha_L \Delta T. \quad (4)$$

In general, concrete has linear CTE in the range of $5-15 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. AASHTO T366-11 [8] and AASHTO TP60-00 [9] are widely used standards for the determination of coefficient of thermal expansion of hydraulic cement concrete. The procedure described in these two specifications are identical and determine the coefficient of thermal expansion of a cylindrical specimen, which is maintained in a saturated condition, by measuring the change in length of the specimen at temperatures of 10°C and 50°C . Procedure described in ASTM C531-00 [10] can be used to determine coefficient of thermal expansion for mortars, grouts and polymer concretes. This test method is limited to materials with maximum aggregate size of 6 mm and requires for the specimen to be measured at 23°C and 100°C to determine the CTE. However, at such high temperatures, loss of moisture from the sample could trigger change in length of the sample thus introducing an error in the calculated CTE. Measuring changes in length according to the procedure described in ASTM C490-11 [11] can also be used to calculate linear CTE after applying corrections for length changes due to embedded studs.

2.3. HEAT CAPACITY (SPECIFIC HEAT)

Heat capacity is the measure of the amount of heat energy required to change the temperature of a substance by one degree. In SI units, heat capacity is expressed in joule per kelvin (J/K). Heat capacity depends on the size of the object

wyznacza się na próbkach cylindrycznych, utrzymywanych w stanie nasycenia, mierząc zmianę długości próbki w temperaturze 10°C i 50°C. Procedura przedstawiona w normie ASTM C531-00 [10] znajduje wykorzystanie przy ustalaniu współczynnika rozszerzalności cieplnej zapraw, zaczynów cementowych i polimerobetonów. Metoda ta nie może być jednak stosowana w przypadku materiałów zawierających kruszywo grubsze niż 6 mm, a ponadto wymaga przeprowadzenia pomiarów w temperaturze 23°C i aż 100°C. Tak wysoka temperatura powoduje zmniejszenie wilgotności próbki, co może spowodować zmianę jej długości obciążając błędem wyznaczoną w ten sposób wartość współczynnika rozszerzalności cieplnej. Zmiany długości zmierzone przy wykorzystaniu procedury opisanej w normie ASTM C490-11 [11] można również wykorzystać do wyznaczenia współczynnika liniowej rozszerzalności cieplnej pod warunkiem uwzględnienia wpływu osadzonych kołków.

2.3. POJEMNOŚĆ CIEPLNA (CIEPŁO WŁAŚCIWE)

Pojemność cieplna określa ilość energii cieplnej, jaka potrzebna jest, by zmienić temperaturę materiału o jeden stopień. W układzie SI pojemność cieplną materiału wyraża się w dżulach na kelwin (J/K). Jako że pojemność cieplna zależy od wielkości obiektu, parametrem wykorzystywanym do scharakteryzowania właściwości cieplnych materiału jest pojemność cieplna właściwa (inaczej ciepło właściwe). W układzie SI ciepło właściwe wyraża się w dżulach na kilogram na kelwin (J/kg/K). Podobnie jak współczynniki rozszerzalności cieplnej i przewodzenia, również ciepło właściwe ma stałą wartość jedynie w ograniczonym zakresie temperatury. Ciepło właściwe betonu wyznaczyć można korzystając z metody ASTM D4611-08 [12] oryginalnie przeznaczonych do wyznaczania ciepła właściwego skał i gruntu. Powyższa procedura wymaga jednak użycia do badań suchej próbki. Do wyznaczenia ciepła właściwego betonu w zakresie temperatury, w którym nie mają miejsca żadne przemiany fazowe, wykorzystać można również procedurę opisaną w normie ASTM D2766 - 95 [13].

2.4. CIEPŁO HYDRATACJI I SZYBKOŚĆ WYDZIELANIA CIEPŁA

Hydratacja spoiw hydraulicznych jest procesem egzotermicznym. Ciepło hydratacji wyrażane w dżulach na gram cementu niezhydratyzowanego stanowi ilość ciepła, jaka zostanie wydzielona w całym procesie hydratacji. Niska w przypadku betonu wartość współczynnika przewodzenia ciepła oznacza, że ciepło hydratacji może powodować

and therefore specific heat capacity (or specific heat), which is defined as heat capacity per unit mass of the material, is more often used to characterize the material. The SI units for specific heat is joules per kilogram per kelvin (J/kg/K). Similar to CTE and thermal conductivity, specific heat of an object is constant only over a small range of temperature values. ASTM D4611-08 [12], which is applicable for rocks and soils, can be employed to determine the specific heat of concrete. However, the procedure described in the aforementioned specification requires the specimen to be dry. The procedure described in ASTM D2766 - 95 [13] can also be employed to determine the specific heat of concrete over a temperature range in which no phase transformations occur.

2.4. HEAT OF HYDRATION AND RATE OF HEAT EVOLUTION

Hydration of cementitious materials is an exothermic reaction. Heat of hydration, expressed in joules per gram of unhydrated cement, is the quantity of heat evolved on complete hydration. Concrete has low thermal conductivity and therefore the heat evolved during hydration can result in temperature gradient across pavement cross-section. Temperature development in the concrete slab is determined by the balance between heat generation in hardening concrete and heat exchange with the environment. Therefore, the knowledge of heat of hydration and rate of heat evolution is essential for predicting the development of thermal stresses in concrete at early ages. Heat of hydration and peak rate of heat evolution of concrete varies from 200-450 J/g and 20-50 J/(g·h) respectively, depending on the mixture composition [14, 15]. Both, the thermal conductivity and the heat capacity of hardening concrete, are known to be dependent on the degree of hydration of cement. However, at early ages, during the transformation of concrete mixture into a solid material, the evolution of thermal properties is hard to predict analytically. For such a purpose, an inverse solution method was applied successfully [16]. Such an approach was found [17] to be effective to evaluate the mixture composition effects, particularly effects of fly ashes and blended cements, on the rate of rise of the fresh concrete temperature, on the time of occurrence of the maximum temperature and on the temperature gradients.

powstanie gradientu temperatury wewnątrz nawierzchni betonowych. Wzrost temperatury wewnątrz płyty betonowej wynika z bilansu pomiędzy ilością ciepła wytwarzanego w procesie hydratacji i wymiany ciepła z otoczeniem. W związku z powyższym, aby prawidłowo przewidzieć rozwój naprężeń termicznych na wczesnym etapie twardnienia betonu niezbędna jest znajomość ciepła hydratacji i szybkości jego wydzielania. W zależności od składu mieszanki [14, 15] ilość wydzielonego ciepła hydratacji może przyjąć wartość z przedziału 200-450 J/g przy maksymalnej szybkości wydzielania ciepła w przedziale 20-50 J/(g·h). Wiadomo, że zarówno współczynnik przewodzenia ciepła, jak i pojemność cieplna twardniejącego betonu zależą od stopnia hydratacji cementu. Trudno jest przewidzieć za pomocą metod analitycznych jakim zmianom będą podlegały właściwości termiczne betonu na wczesnym etapie twardnienia, gdy mieszanka betonowa ulega stopniowej transformacji do stanu stałego. W tym celu z powodzeniem zastosowano metodę rozwiązywania problemu odwrotnego [16]. Podejście takie sprawdziło się przy ocenie wpływu składu mieszanki [17], w szczególności dodatku popiołów lotnych oraz cementów wieloskładnikowych, na szybkość wzrostu temperatury betonu w okresie występowania maksymalnej temperatury oraz na gradienty temperatury.

2.5. WPŁYW TEMPERATURY NA WŁAŚCIWOŚCI MIESZANKI BETONOWEJ I BETONU NA WCZESNYM ETAPIE TWARDNIENIA

Ponieważ temperatura wpływa na szybkość hydratacji cementu, właściwości betonu na wczesnym etapie twardnienia znacząco zależą od temperatury. Wysoka temperatura podczas pielęgnacji betonu zwiększa jego wczesną wytrzymałość. Jednocześnie, wysoka temperatura otoczenia może również wywołać pewne niepożądane zjawiska, takie jak utrata urabialności, wypływ wody na powierzchnię betonu oraz wczesne rysy termiczno-skurczowe.

Temperatura mieszanki ma istotny wpływ na jej urabialność. Wzrost temperatury mieszanki z 45°F (7,2°C) do 95°F (35°C) dwukrotnie zmniejsza opad stożka [18]. Ghafoori i Diawara [19] stwierdzili w przypadku betonu samozagęszczalnego zmniejszenie rozplywu stożka o 25%, 12% i 5% przy zwiększeniu temperatury do odpowiednio 43°C, 36°C i 28°C w porównaniu do pomiaru kontrolnego w temperaturze 21°C. Jednocześnie w temperaturze poniżej 21°C rozplyw stożka zwiększył się jedynie nieznacznie [19].

2.5. EFFECTS OF TEMPERATURE ON FRESH AND EARLY AGE CONCRETE PROPERTIES

The rate of hydration of cement increases with temperature and therefore temperature of fresh concrete significantly alters the early age properties of concrete. High curing temperatures result in high early age strengths. However, exposure to high ambient temperatures can lead to some deleterious effects such as slump loss, bleeding, and early age cracking.

The workability of concrete is significantly affected by its temperature. The slump values halves when the temperature of concrete is increased from 45°F (7.2°C) to 95°F (35°C) [18]. Ghafoori and Diawara [19] reported an average slump flow loss of about 25%, 12% and 5%, respectively, at the temperature of 43, 36 and 28°C for self-compacting concrete compared to reference measurement at 21°C. However, at temperatures lower than 21°C, a minor gain in the slump flow of concrete was observed [19].

At high ambient temperatures, the temperature of concrete and its water demand increases. The initial setting time is halved when temperature is increased from 28°C to 46°C [20]. High temperature also increases the rate of bleeding without significantly altering the bleeding capacity. However, at low temperatures, bleeding capacity may increase due to slow rate of hydration [20]. Concrete attains 65, 40 and 20% of the 28-day compressive strength (for concrete cured at 21°C) after 3-days of curing at 46, 21 and 4°C respectively [20]. This increase in early age strength gain at higher temperatures is associated with the increased rate of hydration observed at elevated temperatures.

3. EFFECTS OF MIXTURE DESIGN ON THERMAL PROPERTIES OF HARDENED CONCRETE

3.1. GENERAL REMARKS

Occurrence of temperature gradient may lead to significant deformation and cracking in concrete pavements. Numerous commercial software packages such as ABACUS, ADINA-T or HIPERPAVE etc. can be used to predict stress development and heat conduction in concrete exposed to thermal loads. Thermal properties of concrete such as thermal conductivity, CTE and heat capacity are some of the inputs required to solve the heat transfer problem and to predict the stresses and strains in concrete structures such as pavements [21].

Wysoka temperatura otoczenia podnosi temperaturę mieszanki i zwiększa jej wodozadržność. Zwiększenie temperatury z 28°C do 46°C skraca czas początku wiązania o połowę [20]. Podwyższona temperatura zwiększa również szybkość wypływu wody na powierzchnię betonu (bleeding), jednak bez istotnego wpływu na całkowitą ilość odsączonej wody. Jednocześnie, w niższej temperaturze całkowita ilość odsączonej wody może ulec zwiększeniu z powodu wolniejszej hydratacji [20]. Po trzech dniach dojrzewania w temperaturze 46°C, 21°C lub 4°C beton osiąga wytrzymałość odpowiadającą odpowiednio 65%, 40% i 20% 28-dniowej wytrzymałości na ściskanie, określonej przy dojrzewaniu w temperaturze 21°C. Stwierdzony wzrost wczesnej wytrzymałości betonu w przypadku wyższej temperatury dojrzewania wynika z większej szybkości hydratacji przy podwyższonej temperaturze.

3. WPŁYW SKŁADU MIESZANKI NA WŁAŚCIWOŚCI TERMICZNE STWARDNIAŁEGO BETONU

3.1 UWAGI OGÓLNE

Powstanie gradientu temperatury może prowadzić do znaczących odkształceń i pęknięcia nawierzchni betonowych. Predykcję wzrostu naprężeń i przewodzenia ciepła przez beton podlegający obciążeniom termicznym umożliwiają rozmaite dostępne na rynku programy komputerowe, takie jak m.in. ABACUS, ADINA-T lub HIPERPAVE. Rozwiązanie problemu przepływu ciepła oraz prognozowanie powstawania naprężeń i odkształceń nawierzchni betonowych wymaga znajomości właściwości termicznych betonu, takich jak współczynnik przewodzenia ciepła, współczynnik rozszerzalności cieplnej oraz pojemność cieplna.

Beton jest materiałem niejednorodnym, złożonym z ziaren grubego kruszywa, ziaren kruszywa drobnego oraz otaczającej ziarna matrycy cementowej (stwardniałego zaczynu cementowego). Jak można przypuszczać, właściwości termiczne betonu będą zależały od właściwości termicznych jego składników. Kruszywo zajmuje około 70% objętości betonu i dlatego jego właściwości termiczne w dużym stopniu wpływają na właściwości termiczne betonu. W przypadku bardzo dużych różnic we właściwościach termicznych pomiędzy kruszywem a zaczynem cementowym, co dotyczy w szczególności współczynnika rozszerzalności cieplnej, duże wahania temperatury mogą powodować nierównomierne przemieszczenia powodujące duże naprężenia lub nawet odspojenie ziaren od zaczynu. Zgodnie z [20] różnice wartości

Concrete is a heterogeneous mixture of coarse aggregates, fine aggregates and cement paste matrix. The thermal properties of concrete will therefore vary depending on the thermal property of its ingredients. Aggregates occupy about 70% of the volume of the concrete and therefore the thermal properties of aggregates significantly affect the thermal properties of the concrete incorporating them. Another issue associated with a heterogeneous material like concrete is that if the thermal properties of aggregate, especially its CTE, is very different from that of paste, a large change in temperature may introduce differential movements and stresses or break the bond between paste and aggregates. When CTE's for paste and aggregates differ by more than $5.5 \cdot 10^{-6}$ per °C, the durability of concrete subjected to freezing and thawing may be affected [20]. The effect of mixture design on the thermal properties of concrete such as thermal conductivity, CTE and specific heat are presented in the following sections.

3.2. EFFECTS OF MIXTURE DESIGN ON THERMAL CONDUCTIVITY OF CONCRETE

As shown in Figs. 1 and 2, the thermal conductivity of concrete depends primarily on its aggregate volume fraction and moisture content [22, 23, 24]. In addition, the thermal conductivity of concrete is also altered by the type of aggregate [20]. In general, concrete containing dense aggregates (e.g. quartz) demonstrate higher thermal conductivity. On the other hand, lightweight concrete, which contains lightweight aggregate (which is highly porous), demonstrates lower thermal conductivity because air is a poor conductor of heat. Table 1 lists the values of thermal conductivity of different aggregates and concrete incorporating those aggregates. The mineralogy of aggregates also influences the thermal conductivity of concrete incorporating them. The thermal conductivity of concrete increased with increasing crystallinity of aggregates [20]. For example, the concrete incorporating quartz as aggregate demonstrates higher thermal conductivity than concrete with limestone or dolomite as aggregate. Panesar et al. [25] partially replaced aggregates in concrete with cork, which is a naturally occurring lightweight cellular material extracted from the bark of Cork Oak trees, and found that 10% and 20% replacement resulted in 16% and 30% reduction in thermal conductivity respectively. They ascribed the reduction in conductivity to the low density and high gas content of cork's cellular structure.

współczynników rozszerzalności cieplnej zaczynu i kruszywa przekraczające około $5,5 \cdot 10^{-6}$ na $^{\circ}\text{C}$ mogą wpływać negatywnie na mrozoodporność betonu poddanego cyklicznemu zamrażaniu i rozmrażaniu. W poniższych rozdziałach omówiono wpływ składu mieszanki betonowej na poszczególne właściwości termiczne betonu.

3.2. WPŁYW SKŁADU MIESZANKI NA PRZEWODNOŚĆ CIEPLNĄ BETONU

Jak widać na Rys. 1 i 2, współczynnik przewodzenia ciepła betonu zależy przede wszystkim od udziału objętościowego kruszywa oraz wilgotności [22, 23, 24]. Ponadto, na wartość współczynnika przewodzenia ciepła wpływ może mieć również rodzaj użytego kruszywa [20]. Betony zawierające kruszywa o większej gęstości (np. kruszywa kwarcowe) charakteryzują się na ogół wyższym współczynnikiem przewodzenia ciepła. Z drugiej strony, betony lekkie zawierające kruszywo lekkie, a więc bardzo porowate, charakteryzują się niższą wartością współczynnika przewodzenia ciepła, co wynika z właściwości izolacyjnych powietrza. W Tabl. 1 podano wartości współczynnika przewodzenia ciepła różnych kruszyw i wyprodukowanych z ich użyciem betonów. Również skład mineralogiczny kruszyw ma wpływ na przewodność cieplną betonu. Współczynnik przewodzenia ciepła wzrasta wraz ze wzrostem wskaźnika krystaliczności kruszywa [20]. Przykładowo: beton zawierający kruszywo kwarcowe charakteryzuje się wyższym współczynnikiem przewodzenia ciepła niż beton zawierający kruszywo wapienne lub dolomitowe. Panesar et al. [25] zastąpili część kruszywa mineralnego korkiem – naturalnie występującym materiałem komórkowym, uzyskanym z kory dębu korkowego, stwierdzając, że zastąpienie 10% i 20% kruszywa mineralnego korkiem spowodowało zmniejszenie wartości współczynnika o odpowiednio o 16% i 30%. Zmniejszenie wartości współczynnika przewodzenia ciepła przypisali oni mniejszej gęstości i wyższej zawartości fazy gazowej, związanej z komórkową strukturą korka.

Przeprowadzone niedawno badania betonu lekkiego [26] wykazały liniowy spadek wartości współczynnika przewodzenia ciepła w miarę wzrostu porowatości. Liniową zależność można również stwierdzić pomiędzy gęstością betonu i współczynnikiem przewodzenia ciepła, widoczną zwłaszcza w przypadku betonów lekkich, o dużej zawartości powietrza charakteryzującego się niską wartością niską wartością współczynnika przewodzenia ciepła [20]. Zależność współczynnika przewodzenia ciepła betonu lekkiego od gęstości i wilgotności przedstawiono w Tabelicy 2.

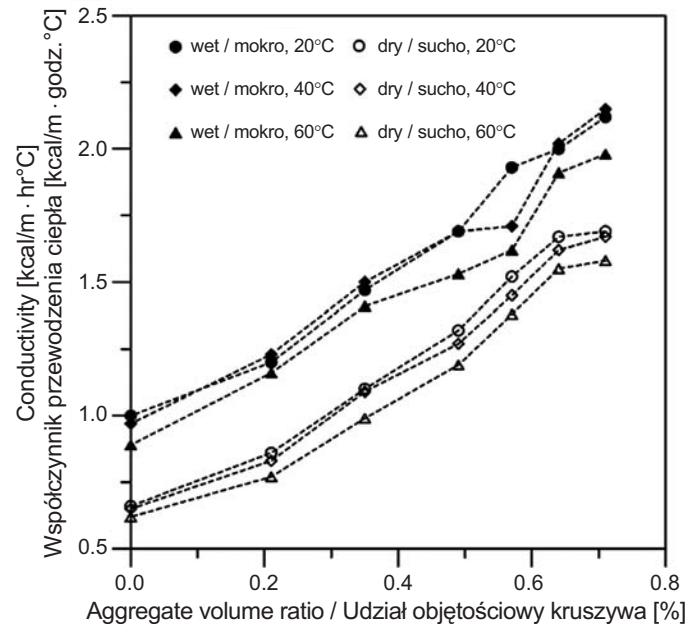


Fig. 1. Variation in thermal conductivity with respect to aggregate volume ratio [23]

Rys. 1. Krzywa przedstawiająca zależność współczynnika przewodzenia ciepła od udziału objętościowego kruszywa [23]

Reprinted from Cement and Concrete Research, Vol. 33, No. 3, Kim K.H., Jeon S.E., Kim J.K., Yang S., An experimental study on thermal conductivity of concrete, 363-371, Copyright (2003), with permission from Elsevier

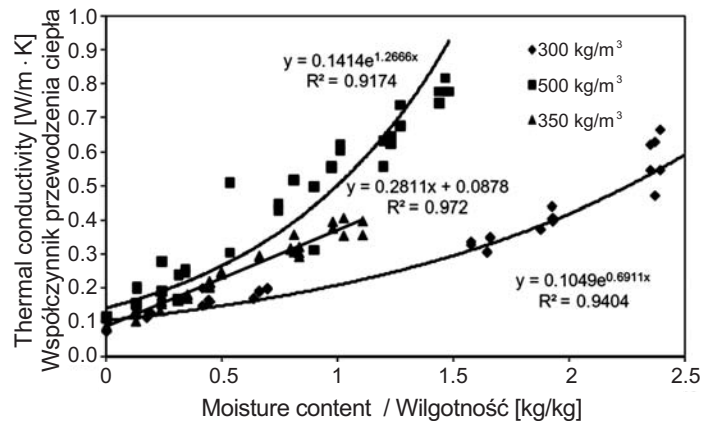


Fig. 2. Thermal conductivity as a function of moisture content [24]

Rys. 2. Współczynnik przewodzenia ciepła w funkcji wilgotności [24]

Reprinted from Construction and Building Materials, Vol. 41, Jerman M., Keppert M., Výborný J., Černý R., Hygric, Thermal and durability properties of autoclaved aerated concrete, 352-359, Copyright (2013), with permission from Elsevier

Recent study [26] conducted on lightweight concrete has revealed that thermal conductivity linearly decreased as the porosity increased. A linear relationship exists between

Table 1. Thermal conductivity of aggregates and concretes [20, 23]
 Tablica 1. Współczynnik przewodzenia ciepła kruszyw i betonów [20, 23]

Type of aggregate Rodzaj kruszywa	Thermal conductivity of aggregate Współczynnik przewodzenia ciepła kruszywa [W/(m·K)]	Wet density of concrete Gęstość betonu w stanie wilgotnym [kg/m ³]	Thermal conductivity of concrete Współczynnik przewodzenia ciepła betonu [W/(m·K)]
Quartzite / Kwarcyt	3	2440	3.5
Dolomite / Dolomit	n.a. / b.d. ^{*)}	2500	3.3
Limestone / Wapień	1.26 - 1.33	2450	3.2
Granite / Granit	1.7 - 4.0	2420	2.6
Basalt / Bazalt	n.a. / b.d. ^{*)}	2520	2.0
Expanded shale / Łupek ekspandowany	n.a / b.d. ^{*)}	1590	0.85

^{*)} n.a. / b.d. – not available / brak danych

density of concrete and its thermal conductivity, especially for lightweight concretes incorporating high volumes of air which demonstrates low thermal conductivity [20]. Table 2 presents the changes occurring in thermal conductivity of lightweight concrete with variation in density and moisture content.

Table 2. Variation in thermal conductivity of lightweight aggregate concrete with density (adopted from [20])
 Tablica 2. Zależność współczynnika przewodzenia ciepła betonu lekkiego od gęstości (na podstawie [20])

Moisture Content [% vol.] Wilgotność [% obj.]	Conductivity / Współczynnik przewodzenia ciepła [W/(m·K)]							
	Concrete protected from weather Beton zabezpieczony przed czynnikami atmosferycznymi				Concrete exposed to weather Beton narażony na czynniki atmosferyczne			
	5	5	5	2.5	8	8	8	5
Unit mass [kg/m ³] Masa jednostkowa	Aerated concrete Beton komórkowy	Concrete with expanded slag Beton na żużlu pumeksowym	Concrete with expanded clay Beton na kruszywie keramzytowym	Normal weight aggregate concrete Beton na kruszywie o naturalnej gęstości	Aerated concrete Beton komórkowy	Concrete with expanded slag Beton na żużlu pumeksowym	Concrete with expanded clay Beton na kruszywie keramzytowym	Normal weight aggregate concrete Beton na kruszywie o naturalnej gęstości
320	0.109	0.087	0.130	–	0.123	0.100	0.145	–
480	0.145	0.116	0.173	–	0.166	0.130	0.187	–
640	0.203	0.159	0.230	–	0.223	0.173	0.260	–
800	0.260	0.203	0.303	–	0.273	0.230	0.332	–
960	0.315	0.260	0.376	–	0.360	0.289	0.433	–
1120	0.389	0.315	0.462	–	0.433	0.360	0.519	–
1280	0.476	0.389	0.562	–	0.533	0.433	0.635	–
1440	–	0.462	0.678	–	–	–	–	–
1600	–	0.549	0.794	0.706	–	–	–	0.808
1760	–	0.649	0.952	0.838	–	–	–	0.952
1920	–	–	–	1.056	–	–	–	1.194
2080	–	–	–	1.315	–	–	–	1.488
2240	–	–	–	1.696	–	–	–	1.904
2400	–	–	–	2.267	–	–	–	2.561

Spadek współczynnika przewodności cieplnej wraz ze wzrostem temperatury jest nieznaczny w zakresie temperatury 20-60°C (jak widać na Rys. 1) [23]. Khaliq i Kodur [27] przeprowadzili badania właściwości termicznych betonu samozagęszczalnego (SCC) poddanego działaniu wysokiej temperatury i stwierdzili, że współczynnik przewodzenia ciepła początkowo zwiększa swoją wartość w przedziale do 400°C, by następnie zacząć nieznacznie spadać w przedziale 400-500°C i ostatecznie znów zacząć rosnąć aż do temperatury 800°C (Rys. 3). Taki przebieg zmian wartości współczynnika przewodzenia ciepła przypisać można spadkowi wilgotności wraz ze wzrostem temperatury. Do około 400°C mamy do czynienia z ciągłym spadkiem zawartości wody w betonie, który przekłada się na zmniejszenie wartości współczynnika przewodzenia ciepła [27]. Jego nieznaczny wzrost w przedziale 400-500°C można wytłumaczyć rozkładem wodorotlenku wapnia na tlenek wapnia i wodę. Dalszy spadek współczynnika przewodzenia ciepła można przypisać dalszemu spadkowi wilgotności [27]. Beton samozagęszczalny ma bardziej zwartą mikrostrukturę (charakteryzującą się drobniejszymi i słabo połączonymi porami) w porównaniu do betonu zwykłego, co skutkuje innym przebiegiem malejącej zależności współczynnika przewodzenia ciepła od temperatury. Zasadniczą przyczyną spadku współczynnika przewodzenia ciepła ze wzrostem temperatury jest odparowanie wody z betonu.

Wykresy pokazane na Rys. 4 uwidaczniają różnice wartości współczynnika przewodzenia ciepła pomiędzy betonem, zaprawami i zaczynem cementowym (matrycą). Współczynnik przewodzenia ciepła matrycy cementowej jest dwukrotnie niższy niż w przypadku betonu. W przypadku zapraw mieści się pomiędzy wartościami współczynnika betonu i matrycy cementowej. Można stąd wywnioskować, że współczynnik przewodzenia ciepła kruszywa grubego ma znaczący wpływ na wartość współczynnika przewodzenia ciepła całego betonu. Stwierdzono, że współczynnik przewodzenia ciepła matrycy cementowej zmniejsza się wraz ze wzrostem wskaźnika wodno-cementowego [23]. Kim et al. [23] powiązali ten spadek przewodności z niższym (w porównaniu z cementem) współczynnikiem przewodzenia ciepła wody. Przyczyn zmienności współczynnika przewodzenia ciepła betonu w powiązaniu ze zmianami wskaźnika wodno-cementowego można ponadto upatrywać w zależności porowatości od w/c . Jak wiadomo, w przypadku matrycy cementowej wyższa wartość wskaźnika w/c oznacza większą porowatość [20], a powietrze charakteryzuje się wyższym współczynnikiem przewodzenia ciepła niż woda. Tym sposobem spadek współczynnika przewodzenia ciepła ze wzrostem wskaźnika w/c jest wyraźniejszy w przypadku

For temperatures ranging from 20°C to 60°C, the thermal conductivity decreased slightly with increasing temperature (as shown in Fig. 1) [23]. Khaliq and Kodur [27] studied the thermal properties of self-compacting concrete (SCC) at elevated temperatures and observed that thermal conductivity initially decreased with temperature up to 400°C, and then it increased marginally between 400°C and 500°C, and finally decreased again up to 800°C (see Fig. 3). This trend in thermal conductivity can be attributed to the variation in moisture content with increase in temperature. Up to temperature of 400°C there is continuous loss of moisture which translates into loss of thermal conductivity [27]. The slight increase in thermal conductivity between 400°C and 500°C is probably due to decomposition of calcium hydroxide into calcium oxide and water. Subsequent decrease in thermal conductivity can be attributed to further loss of moisture [27]. Generally, SCC has a denser microstructure (with finer pore distribution and poor pore connectivity) compared to regular concrete and therefore the rate of decline of thermal conductivity of SCC with temperature will vary from that of regular concrete. In general, concrete shows a reduction in thermal conductivity with increasing temperature due to loss of moisture from its microstructure.

Fig. 4 highlights the differences in the thermal conductivity of concrete, mortars and paste. The thermal conductivity of paste is half that of concrete. The thermal conductivity of mortar ranges between that of paste and concrete. This highlights the influence of aggregates on the thermal conductivity of concrete. The thermal conductivity of paste samples decreased with increasing water to cement ratios [23]. Kim et al. [23] attributed the reduction of thermal conductivity with an increase in water-cement ratio (w/c) to the lower thermal conductivity of water (compared to thermal conductivity of cement). In addition, the observed variation in thermal conductivity of concrete with water-cement ratio can be attributed to changes in porosity resulting from different water-cement ratios. It is a known fact that paste with higher water-cement ratio is more porous [20] and that air has lower thermal conductivity than water. Therefore, the reduction in thermal conductivity with water cement ratio for dry paste is more pronounced than that for wet paste. In general, cement paste with higher porosity (higher water cement ratio) demonstrates lower thermal conductivity because thermal conductivity for both water and air is lower than that of paste.

matrycy suchej (w porównaniu do wilgotnej). Ogólnie stwierdzić można, że matryca cementowa o większej porowatości (o wyższej wartości wskaźnika w/c) będzie się charakteryzować niższym współczynnikiem przewodzenia ciepła, ponieważ zarówno w przypadku powietrza, jak i wody, współczynnik jest niższy w porównaniu do matrycy cementowej.

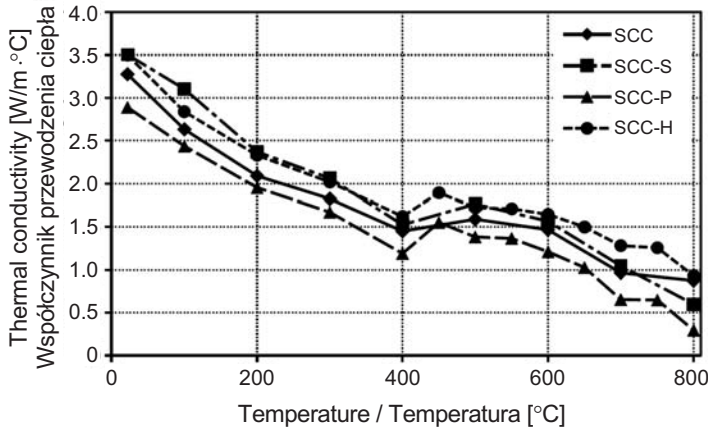


Fig. 3. Thermal conductivity as a function of temperature for self-compacting concrete [27]

Rys. 3. Współczynnik przewodzenia ciepła betonu samozagęszczającego w funkcji temperatury [27]

Reprinted from Cement and Concrete Research, Vol. 41, No. 11, *Khalilq W., Kodur V.*, Thermal and mechanical properties of fiber reinforced high performance self-consolidating concrete at elevated temperatures, 1112-1122, Copyright (2011), with permission from Elsevier

3.3. WPŁYW SKŁADU MIESZANKI BETONOWEJ NA WSPÓŁCZYNNIK ROZSZERZALNOŚCI CIEPLNEJ BETONU

Z powodu różnych wartości współczynnika rozszerzalności cieplnej kruszywa i matrycy cementowej zmiany objętościowe betonu mogą powodować spękania – zarówno mikrospeknięcia w warstwie kontaktowej kruszywa i matrycy cementowej, jak i makrospeknięcia, zwłaszcza pod wpływem zewnętrznego ograniczenia przemieszczeń konstrukcji. Powyższe odkształcenia wywołane są zmianami temperatury i stanu wilgotności betonu. W licznych badaniach stwierdzono zależność współczynnika rozszerzalności cieplnej od stanu wilgotności betonu [28-30]. Rys. 5 przedstawia wpływ wskaźnika nasycenia porów kapilarnych na współczynnik rozszerzalności cieplnej matrycy cementowej (zaczynu cementowego) i betonu. Zauważyć można wyraźny spadek wartości tego współczynnika w przedziale wskaźnika nasycenia porów kapilarnych od 88% do 100% (Rys. 5).

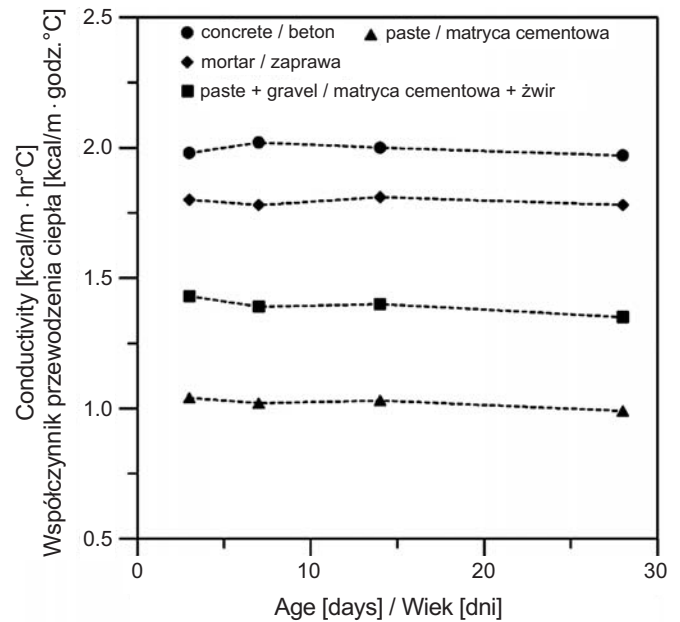


Fig. 4. Thermal conductivity of paste, mortar and concrete [23]
Rys. 4. Współczynnik przewodzenia ciepła zaczynu cementowego, zaprawy i betonu [23]

Reprinted from Cement and Concrete Research, Vol. 33, No. 3, *Kim K.H., Jeon S.E., Kim J.K., Yang S.*, An experimental study on thermal conductivity of concrete, 363-371, Copyright (2003), with permission from Elsevier

3.3. EFFECT OF MIXTURE DESIGN ON CTE OF CONCRETE

Volumetric deformation of concrete may produce both micro-cracking at the paste-aggregate interface and macro-cracking of the concrete structure due to differences in thermal expansion coefficients of cement paste and aggregates especially under the conditions of external restrains. These deformations are caused by changes in temperature and moisture state of concrete. Numerous studies [28-30] have shown that CTE changes with the moisture state of concrete. Fig. 5 illustrates the effects of the degree of capillary saturation on the CTE of cement paste and concrete. There is a significant drop in the CTE when the degree of capillary saturation is increased from 88% to 100% .

A detailed description of the effects of moisture movement on the CTE of concrete is presented by Sellevold and Bjontegaard [29]. Concrete exposed to temperature changes demonstrate variation in moisture profiles which significantly alters the CTE of concrete. These changes in moisture profiles do not occur instantaneously and

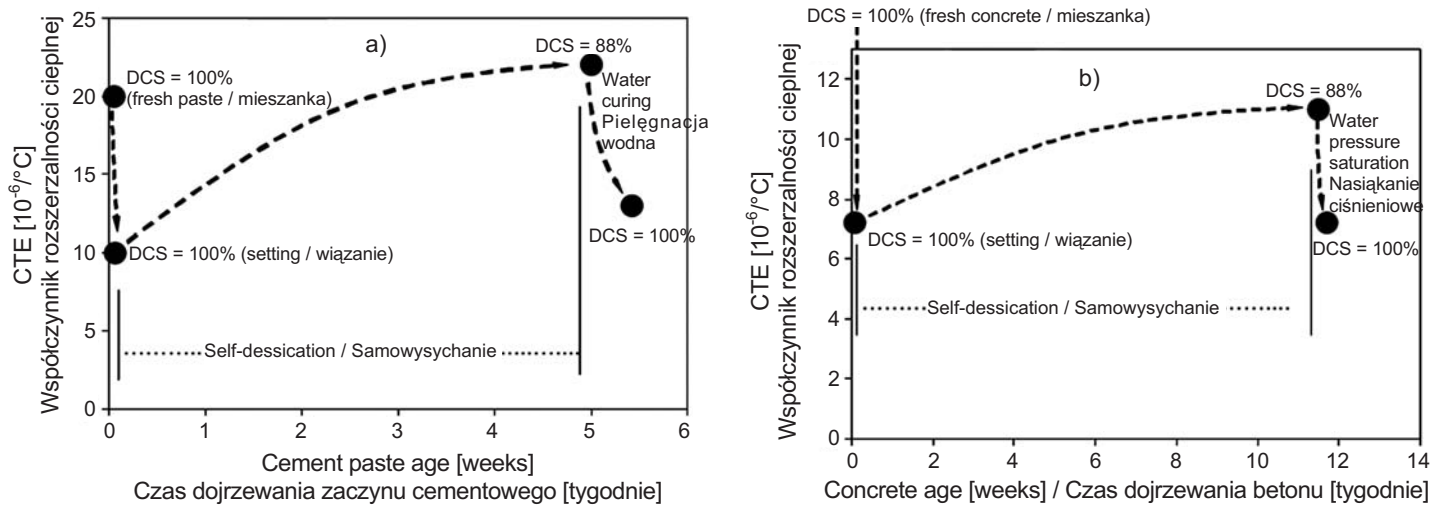


Fig. 5. Effects of the degree of capillary saturation (DCS) on the coefficient of thermal expansion of (a) cement paste ($w/b = 0.4$) and (b) concrete containing the same paste (28% vol.) [29]

Rys. 5. Wpływ wskaźnika nasycenia porów kapilarnych (DCS) na współczynnik rozszerzalności cieplnej CTE: a) matrycy cementowej ($w/s = 0,4$), b) betonu o matrycy z tego samego zaczynu (28% obj.) [29]

Wpływ migracji wilgoci w betonie na współczynnik rozszerzalności cieplnej szczegółowo przedstawili Sellevold i Bjontegaard [29]. Pod wpływem zmian temperatury beton wykazuje zmienny profil wilgotności, co z kolei istotnie wpływa na jego współczynnik rozszerzalności cieplnej. Powyższe zmiany profilu wilgotności nie pojawiają się natychmiast i stąd zmiany współczynnika wskutek migracji wilgoci zauważalne są z pewnym opóźnieniem. Tym sposobem pod wpływem zmian temperatury beton podlega odkształceniom w funkcji czasu. Utrudnia to jednoznaczne zdefiniowanie współczynnika rozszerzalności betonu [29]. W tej sytuacji odkształcenia występujące w betonie pod wpływem zmian temperatury podzielono na odkształcenia natychmiastowe (oznaczane symbolem ID i związane ze współczynnikiem rozszerzalności cieplnej) oraz opóźnione (oznaczane symbolem DD i nie uwzględniane w obliczeniach współczynnika rozszerzalności cieplnej). Odkształcenia wywołane redystrybucją wilgoci zaliczane są do odkształceń opóźnionych tj. typu DD. W przypadku twardniejącego betonu stosunkowo łatwo jest zmierzyć całkowite odkształcenie pod wpływem temperatury, a problemy pojawiają się dopiero wtedy, gdy przychodzi ustalić składniki termiczne i autogeniczne tego odkształcenia. Termiczny składnik odkształcenia obliczony na podstawie przebiegu zmian temperatury oraz odpowiedniej wartości współczynnika rozszerzalności cieplnej [31] odejmuje się od odkształcenia całkowitego. Tym sposobem szacunkową wartość autogenicznego składnika odkształcenia, pojawiającego się podczas twardnienia betonu. Odkształcenia opóźnione wywołane oddziaływaniem termicznym traktuje się więc jako składnik

therefore the change observed in CTE due to moisture movements is delayed. Therefore, concrete exposed to temperature changes demonstrates time dependent deformation. This makes it difficult to uniquely define the CTE of concrete [29]. The deformations occurring in concrete exposed to temperature changes can thus be classified into immediate deformation (ID) (also interpreted as CTE) and delayed deformation (DD) (which is not included in CTE calculations). The deformations caused by moisture redistribution are associated with DD. For fresh concrete, it is relatively easy to measure the total deformation under temperature development but the challenge comes while separating the thermal components and autogenous components of this deformation. Thermal part of the deformation, calculated using temperature history and relevant coefficient of thermal expansion [31], is subtracted from total deformation to provide an estimate of autogenous part of the deformation occurring during hardening of concrete. The delayed deformation due to thermal loading is thus counted as part of autogenous deformation which explains the observed unsystematic behavior of autogenous deformation with respect to temperature history [31]. A strong general agreement exists in literature that both, the CTE's dependence on moisture content and the existence of delayed deformation, are related to temperature-induced redistribution of moisture in concrete [29]. The proposed mechanism can be used to explain two major observations associated with variation of CTE with moisture content: (a) CTE increases sharply as moisture content is reduced, and (b) the DD is large in

odkształcenia autogenicznego, co wyjaśnia zaobserwowaną niesystematyczność zmian odkształcenia autogenicznego w odniesieniu do historii temperatury [31]. Z analizy materiałów źródłowych wynika zgodność opinii, że zarówno zależność współczynnika rozszerzalności cieplnej od wilgotności, jak i występowanie opóźnionych odkształceń mają związek z wywołaną przez temperaturę redystrybucję wilgoci w betonie [29]. Zaproponowany mechanizm może służyć wyjaśnieniu dwóch ważnych obserwacji dotyczących zmienności współczynnika związanej ze zmianą wilgotności: (a) wartość współczynnika wzrasta gwałtownie, gdy spada wilgotność oraz (b) odkształcenia opóźnione (typu DD) są duże w próbkach całkowicie nasyconych i ulegają gwałtownemu zmniejszeniu podczas wysychania [29].

Rozszerzalność cieplną betonów określa się zazwyczaj poprzez współczynnik rozszerzalności liniowej, którego wartość wyznacza się mierząc zmiany długości ogrzewanych próbek za pomocą czujników LVDT, ekstensometrów laserowych, ekstensometrów strunowych oraz światłowodowych czujników odkształceń. Powyższe metody pozwalają dokładnie zmierzyć współczynnik rozszerzalności liniowej stwardniałego betonu, ale nie zapewniają już takiego poziomu dokładności w przypadku pomiaru tego samego parametru przed wiązaniem cementu. Loser et al. [28] obliczyli wartość współczynnika rozszerzalności cieplnej matrycy cementowej korzystając z prawa Archimidesa, mierząc zmianę masy próbki zamkniętej w elastycznej folii zanurzonej w cieczy, której temperaturę zmieniano w trakcie badania. Wykres na Rys. 6 poniżej przedstawia zależność wyznaczonych tą metodą wartości współczynnika rozszerzalności liniowej matrycy cementowej (współczynnik liniowy = 1/3 współczynnika objętościowego). Współczynnik rozszerzalności rośnie w ciągu pierwszych kilku godzin od sporządzenia mieszanki, by zacząć gwałtownie spadać po upływie 7 godzin, co zbiega się w czasie z końcem wiązania. Następujący na dalszym etapie i trwający wiele dni przyrost współczynnika rozszerzalności przypisuje się samowysychaniu zaczynu cementowego [28] tj. spadkowi wskaźnika nasycenia porów kapilarnych. Yeon et al. [32] potwierdzili, że współczynnik rozszerzalności cieplnej betonu tuż przed wiązaniem jest dwukrotnie wyższy niż w fazie stabilnej, spada gwałtownie przy końcu czasu wiązania, by następnie zacząć powoli rosnać.

Ze względu na różne wartości współczynnika rozszerzalności cieplnej dwóch podstawowych składników betonu czyli kruszywa i matrycy cementowej, wartość współczynnika betonu będzie uzależniona od proporcji składników w mieszance. Na współczynnik rozszerzalności duży wpływ ma

saturated samples but reduces sharply with decreasing moisture content [29].

CTE of concretes is generally expressed as linear CTE, which is measured by recording changes in length of samples exposed to thermal loading using LVDT's, lasers, vibrating wire extensometers and fiber-optic deformation sensors. These techniques provide an accurate estimate of linear CTE of hardened concrete but are not so accurate in measuring the same parameter for concrete before set. Loser et al. [28] calculated the CTE of cement paste using Archimedes' principle by measuring the change in mass of sample enclosed in an elastic membrane submerged in a solution whose temperature was altered. Fig. 6 shows the time dependence of linear CTE of paste samples (linear CTE = 1/3 volumetric CTE) measured using the aforementioned technique. The CTE rises for the first few hours of mixing and then shows a sudden drop after 7 hours, which coincides with setting. The subsequent increase over several days is attributed to self-dessication of paste [28], i.e. the decrease in degree of capillary saturation. Yeon et al. [32] also confirmed that CTE of concrete just before set is twice as high as CTE at stabilized stage and after a sudden drop observed during setting it starts to slightly increase.

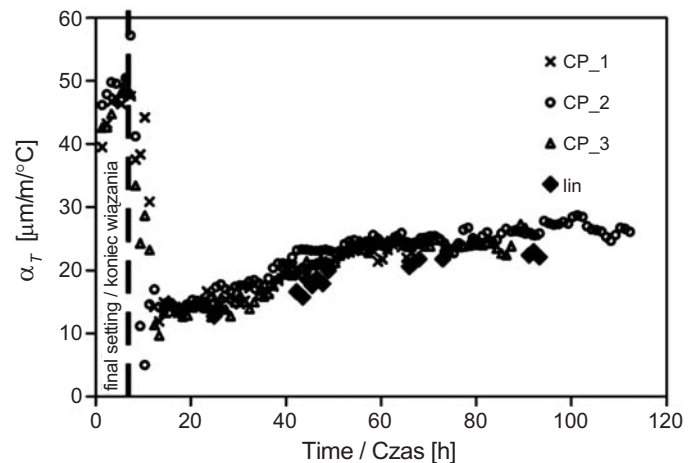


Fig. 6. Time dependent linear coefficient of thermal expansion α_T of three identical paste samples [28]

Rys. 6. Wyznaczona na trzech identycznych próbkach wartość współczynnika rozszerzalności liniowej zaczynu cementowego α_T w funkcji czasu dojrzewania [28]

zarówno rodzaj, jak i zawartość kruszywa. Zasadniczo matryca cementowa charakteryzuje się wyższym współczynnikiem rozszerzalności cieplnej niż kruszywo, co wynika z wykresu na Rys. 4. W takiej sytuacji, szkielet kruszywa ogranicza swobodę odkształceń matrycy cementowej. Skutkuje to powstawaniem naprężeń i obniżeniem wytrzymałości betonu na styku matrycy cementowej i ziaren kruszywa. Współczynnik liniowej rozszerzalności cieplnej matrycy cementowej mieści się w przedziale od $11 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ do $20 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, a w przypadku kruszywa od $0,9 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ do $16 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ (Tabl. 3) [20]. Duże różnice wartości współczynnika rozszerzalności cieplnej pojawiają się w przypadku zastosowania kruszyw o bardzo niskich wartościach tego współczynnika, takich jak granit, marmur i wapień. Różnica wartości współczynnika rozszerzalności między głównymi składnikami betonu przekraczająca $5,5 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, może mieć negatywny wpływ na odporność betonu na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie [20]. Wartość współczynnika rozszerzalności cieplnej betonu jest funkcją zawartości kruszywa (Tabl. 4).

Table 3. Linear coefficients of thermal expansion of different aggregates (adopted from [20])
Tablica 3. Współczynnik rozszerzalności liniowej wybranych kruszyw (przyjęto za [20])

Rock Type Rodzaj skały	Linear CTE Współczynnik rozszerzalności liniowej	
	[$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$]	[$10^{-6}/^{\circ}\text{F}$]
Granite Granit	1.8 - 11.9	1.0 - 6.6
Diorite, andesite Dioryt, andezyt	4.1 - 10.3	2.3 - 5.7
Gabbro, basalt, diabase Gabro, bazalt, diabaz	3.6 - 9.7	2.0 - 5.4
Sandstone Piaskowiec	4.3 - 13.9	2.4 - 7.7
Dolomite Dolomit	6.7 - 8.6	3.7 - 4.8
Limestone Wapień	0.9 - 12.2	0.5 - 6.8
Marble Marmur	1.1 - 16.0	0.6 - 8.9

Uważa się, że betony o niższym współczynniku rozszerzalności cieplnej są trwalsze, gdyż charakteryzują się mniejszymi naprężeniami wywołanymi przez oddziaływania termiczne. Znaczne różnice wartości współczynnika rozszerzalności matrycy cementowej i kruszywa, takie które występują

Two main constituents of concrete, aggregate and cement paste, have dissimilar CTE and therefore the thermal coefficient of concrete varies with mixture proportions. Both, the type of aggregate and the amount of aggregate, have significantly impact on the CTE of concrete. In general, as shown in Fig. 4, cement paste has higher CTE than aggregates. Therefore, aggregates restrain the deformation of cement paste. This builds up stresses and results in weakening of concrete at the interface between paste and aggregate. The linear CTE for cement paste varies between $11 \cdot 10^{-6}$ and $20 \cdot 10^{-6}$ per $^{\circ}\text{C}$ whereas that for aggregates ranges from $0.9 \cdot 10^{-6}$ to $16 \cdot 10^{-6}$ per $^{\circ}\text{C}$ (as shown in Table 3) [20]. A significant difference in thermal coefficients occurs only if aggregates with very low thermal coefficients such as granite, marble and limestone are used. When the two CTE's differ by more than $5.5 \cdot 10^{-6}$ per $^{\circ}\text{C}$, the durability of concrete subjected to freezing and thawing may be affected [20]. The CTE of concrete is a function of the aggregate content (as shown in Table 4).

Table 4. Influence of aggregate content on the coefficient of thermal expansion (adopted from [20])
Tablica 4. Wpływ zawartości kruszywa na wartość współczynnika rozszerzalności cieplnej (przyjęto za [20])

Cement/sand ratio Stosunek masy cementu do piasku	Linear CTE at the age of 2 years Współczynnik rozszerzalności liniowej po 2 latach	
	[$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$]	[$10^{-6}/^{\circ}\text{F}$]
Neat cement Zaczyn cementowy	18.5	10.3
1:1	13.5	7.5
1:3	11.2	6.2
1:6	10.1	5.6

Concrete with lower CTE are considered to be more durable since they will develop lower stresses when exposed to thermal stimulus. However, if the difference between the thermal coefficients for paste and aggregates are significantly high, like in the case of lightweight aggregate concrete, the concrete can be susceptible to cracking around the interfacial transition zone. The CTE of concrete in its fresh state is approximately two to three times higher than hardened concrete, owing to very high CTE of water. When exposed to thermal loading, concrete undergoes volumetric change due to change in temperature and moisture redistribution (caused by changing temperature). Therefore, the moisture conditioning and pore structure of concrete also has a significant effect on its CTE.

w przypadku betonów na kruszywie lekkim, mogą jednak zwiększać podatność betonu na pękanie na styku ziaren kruszywa i matrycy. W związku z bardzo wysoką wartością współczynnika rozszerzalności cieplnej wody współczynnik rozszerzalności cieplnej betonu świeżego jest około 2-3 razy większy od wartości, jaką uzyskuje ten sam beton po stwardnieniu. Oddziaływania termiczne powodują zmiany objętościowe betonu wynikające ze zmiany temperatury oraz redystrybucji wilgoci. W związku z powyższym na wartość współczynnika rozszerzalności cieplnej znaczący wpływ ma również pielęgnacja wilgotnościowa oraz mikrostruktura porów betonu.

3.4. WPŁYW SKŁADU MIESZANKI NA POJEMNOŚĆ CIEPLNĄ BETONU

Beton o wyższej wartości ciepła właściwego (wyższej pojemności cieplnej) jest odpowiedni do zastosowań w izolacjach. Z inną sytuacją mamy do czynienia w przypadku konstrukcji betonowych takich jak nawierzchnie, gdzie w związku z występowaniem gradientów temperatury pożądane jest niższe ciepło właściwe i wyższy współczynnik przewodzenia ciepła.

Ciepło właściwe betonu zwykłego mieści się w przedziale 840-1170 J/kg·K [20]. W przypadku matrycy cementowej Fu et al. [33] podali wartość ciepła właściwego 703 J/kg·K. Zaobserwowali oni również 9% wzrost wartości ciepła właściwego matrycy cementowej w przypadku zastąpienia części cementu pyłem krzemionkowym (około 15% masowo). Ciepło właściwe wody i powietrza wynosi odpowiednio 4200 J/kg·K i 1000 J/kg·K (więcej niż w przypadku matrycy cementowej) i stąd beton o wyższej porowatości (niezależnie od nasycenia) będzie charakteryzował się większym ciepłem właściwym. Ogólnie można powiedzieć, że ciepło właściwe rośnie wraz ze wzrostem wilgotności i maleje wraz ze wzrostem gęstości betonu [20]. W ostatnich latach wielu naukowców zajmuje się sprawą poprawy efektywności energetycznej budynków przez opracowanie mieszanek zawierających materiały zmiennofazowe, charakteryzujące się wyższą pojemnością cieplną [34, 35]. Zwiększenie ilości ciepła potrzebnej do ogrzania próbek w przypadku dodania materiału zmiennofazowego stwierdzili Pomianowski i in. [35] ogrzewając próbki od temperatury 18°C do 23°C. Zhang et al. [34] dodali do mieszanki betonowej kruszywa porowate nasączone materiałem zmiennofazowym stwierdzając, że mają one pojemność cieplną porównywalną z dostępnymi na rynku materiałami zmiennofazowymi, z których wykonywane są bufory termiczne chroniące elektroniczne podzespoły sprzętu komputerowego.

3.4. EFFECTS OF MIXTURE DESIGN ON HEAT CAPACITY OF CONCRETE

Concrete with higher specific heat (heat capacity) is suitable for insulating applications. On the other hand, concrete structures such as pavements, which are exposed to thermal gradients, should have lower specific heat and high thermal conductivity.

The specific heat of ordinary concrete varies from 840-1170 J/kg·K [20]. Fu et al. [33] reported the specific heat of cement paste to be 703 J/kg·K. They also reported a 9% increase in specific heat of cement paste with silica fume (15% replacement by weight). The specific heat of water and air are 4200 J/kg·K and 1000 J/kg·K respectively (greater than cement paste) and therefore concrete with higher porosity (saturated or not) will demonstrate higher specific heat. In general, specific heat increases with an increase in moisture content and temperature and decreases with density of concrete [20]. Recently, lot of research has been focused on improving the energy efficiency of buildings by developing concrete incorporating phase changing materials with higher thermal energy storage capacity [34, 35]. Pomianowski et al. [35] concluded that more heat needs to be provided to samples with phase changing material than to those without it to heat up the sample from 18°C to 23°C. Zhang et al. [34] included porous aggregates saturated with phase changing material in concrete and found that their thermal storage capacity was comparable to commercially available phase changing materials which are usually used as thermal buffer material for electronic components of computers.

4. EFFECTS OF TEMPERATURE ON HIGHWAY PAVEMENT PERFORMANCE

4.1. TEMPERATURE PROFILES AND THERMAL STRESSES IN CONCRETE PAVEMENT SLABS DUE TO DIURNAL AND SEASONAL TEMPERATURE FLUCTUATIONS

During service, concrete pavements are exposed to daily and seasonal fluctuations in temperature. The enhanced integrated climate model (EICM), which is included in the mechanistic-empirical pavement design guide (MEPDG) [2], predicts the temperature and moisture profiles in concrete slabs using thermal properties and local weather data as inputs. The CTE of concrete helps to determine the relative expansion/contraction of layers with different temperatures and therefore it is used to calculate the thermally

4. WPŁYW TEMPERATURY NA WŁAŚCIWOŚCI EKSPLOATACYJNE NAWIERZCHNI DROGOWYCH

4.1. PROFILE TEMPERATURY I NAPRĘŻENIA TERMICZNE POWSTAJĄCE W NAWIERZCHNIACH BETONOWYCH POD WPŁYWEM DOBOWYCH I SEZONOWYCH WAHAŃ TEMPERATURY

W trakcie eksploatacji nawierzchnie betonowe narażone są na dobowe i sezonowe wahania temperatury. Podręcznik mechanistyczno-empirycznego projektowania nawierzchni (MEPDG) [2] zawiera tzw. zintegrowany model klimatyczny (EICM), który stanowi narzędzie umożliwiające prognozowanie profili temperatury i wilgotności w płytach betonowych. Jako dane wejściowe wykorzystuje się właściwości termiczne betonu w płytach oraz lokalne dane klimatyczne. Znajomość współczynnika rozszerzalności cieplnej betonu umożliwia wyznaczenie względnego wydłużenia lub skrócenia warstw o różnej temperaturze, w związku z czym współczynnik rozszerzalności jest wykorzystywany do wyznaczania naprężeń termicznych na różnych głębokościach płyty. Charakterystyka eksploatacyjna płyt betonowych podlegających oddziaływaniu dobowych i sezonowych wahań temperatury zależy od wielkości powstających w nich naprężeń termicznych, wywołanych gradientami temperatury na grubości płyty.

W ciągu dnia temperatura powietrza zwiększa temperaturę powierzchni betonowej płyty nawierzchni. Rozszerzaniu górnej powierzchni płyty będzie towarzyszyło kurczenie się jej dolnej powierzchni. Gdyby płyta miała pełną swobodę przemieszczeń i zerową masę, powyższe warunki powodowałyby wyginanie jej brzegów ku dołowi. Ruchy te ogranicza jednak ciężar własny płyty, powodując w ten sposób powstawanie naprężeń ściskających w górnych warstwach płyty i naprężeń rozciągających w warstwach dolnych. Gdy naprężenia rozciągające przekroczą wytrzymałość betonu na rozciąganie, na spodzie konstrukcji powstaną spękania propagujące się ku górze. Z odwrotną sytuacją mamy do czynienia w porze nocnej, gdy powstawać mogą spękania na górnej powierzchni, propagujące się w dół konstrukcji. Wzory pozwalające wyznaczyć wartości naprężeń powstających w płytach pod wpływem liniowego gradientu temperatury opracowali Westergaard (1926) i Bradbury (1938).

Wyniki licznych badań [36-38] wskazują jednak, że rozkłady temperatury w płytach nawierzchni betonowej są

induced stresses in the concrete slab at varying depths. The performance of plain concrete slabs exposed to diurnal and seasonal temperature fluctuations depends on the thermal stresses generated, which in turn are governed by thermal gradients across the slab.

During day time, the air temperature increases the surface temperature of the pavement slab. The top surface of the pavement tends to expand with respect to the neutral axis whereas the bottom surface contracts. If the slab were unrestrained and weightless, these conditions would result in downward curling of the slab. However, the weight of the slab pavement prevents these motions and induces compressive stresses in the top layers of the slab and tensile stresses in the bottom layers. If the tensile stress exceeds the tensile strength of concrete, bottom up cracking is observed. The opposite situation occurs during nighttime and top down cracking is realized. Westergaard (1926) and Bradbury (1938) developed equations to determine the stresses in slabs subjected to linear temperature gradient.

However, numerous studies [36-38] have shown that the temperature profiles in concrete pavement slabs are non-linear. Fig. 7 shows the variation in temperature with depth in a 10 inch thick concrete pavement in Louisiana in November. Nantung [38] reported that sudden changes in air temperature created a large difference in temperature between top and bottom portions of a 15 inch thick concrete pavement slab. The most drastic differences were recorded when air temperature changed radically from cold to hot during spring. The temperature of the top half of the pavement vary more compared to the bottom half of the pavement slab due to diurnal air temperature variations (as shown in Fig. 7) [37, 38]. On average, slabs with shorter joint spacing and lower thickness experience lower stresses due to diurnal temperature variation [38]. Kodide and Shin [36] concluded that the predicted temperature profile of EICM has the same trend as those measured experimentally but the EICM predicted temperature values are lower than those measured experimentally. In addition, the EICM predicted temperature gradients reported no peaks as opposed to experimentally measured temperature gradients. Equations to calculate the thermal stresses in the fixed or free slabs are presented in publication by Zhu [39]. The presence of dowel bars, which assist in transferring load between slabs, introduces additional tensile stresses in regions around them. Mackiewicz [21] showed that maximum tensile stresses (experienced around the dowel) reach a value of 2.0 MPa when the difference in temperature between the top and bottom of the concrete slab was +20°C. Mackiewicz also observed that

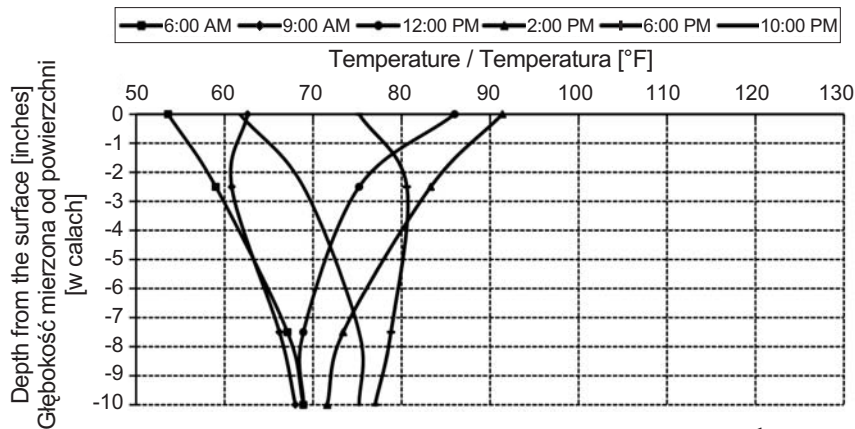


Fig. 7. Daily temperature profiles for 10 inch thick plain concrete pavement slab in Louisiana in November [37]

Rys. 7. Profile dobowe temperatury w płycie nawierzchniowej z betonu zwykłego o grubości 10 cali (25,4 cm) na podstawie pomiarów wykonanych w listopadzie w Luizjanie, USA [37]

nieliniowe. Rys. 7 przedstawia zmiany temperatury wraz z głębokością w płycie betonowej o grubości 10 cali (25,4 cm) odnotowane w listopadzie w stanie Luizjana na terenie USA. Nantung [38] przeprowadził badania płyty betonowej o grubości 15 cali (38,1 cm) stwierdzając, że zmiana temperatury powietrza wywołuje duże różnice temperatury między górną i dolną powierzchnią. Najbardziej drastyczne różnice odnotowano w czasie gwałtownego wzrostu temperatury w okresie wiosennym. Dobowe wahania temperatury skutkują większymi wahaniami temperatury w obrębie górnej połowy płyty w porównaniu do jej dolnej części (Rys. 7) [37, 38]. Płyty o mniejszym rozstawie szczelin i mniejszej grubości charakteryzują się przeciętnie niższymi wartościami naprężeń wywołanych dobowymi wahaniami temperatury [38]. Kodide i Shin [36] stwierdzili, że rozkład temperatury uzyskany przy wykorzystaniu modelu EICM wykazuje taki sam trend, jak temperatura wyznaczona doświadczalnie, choć w tym pierwszym przypadku temperatura były niższa od wyznaczonej doświadczalnie. Ponadto, prognozowane przy użyciu modelu EICM gradienty temperatury nie wykazują ekstremów, które zostały odnotowane w przypadku pomiarów doświadczalnych. Wzory do obliczania naprężeń termicznych w płytach sztywno utwierdzonych i swobodnie opartych zaproponował Zhu [39]. Dyble zakładane, aby poprawić przenoszenie obciążeń między płytami, wprowadzają w swoim otoczeniu dodatkowe naprężenia rozciągające. Według Mackiewicza [21] maksymalne naprężenia rozciągające (wywołane dookoła dybli) sięgają 2,0 MPa, gdy temperatura górnej powierzchni jest wyższa o 20°C od temperatury na powierzchni dolnej. Mackiewicz odnotował również wzrost naprężeń rozciągających w przypadku zastosowania dybli o mniejszej średnicy. W przypadku dybli o większych średnicach maksymalne wywołane przez nie naprężenia rozciągające nie przekraczają wytrzymałości betonu i pod wpływem dobowych wahań temperatury mogą powodować jedynie mikrospeknięcia i szkody zmęczeniowe.

the magnitude of the tensile stresses is greater for small diameter dowel bars. For larger diameter dowel bars, where the maximum tensile stresses do not exceed the concrete strength, daily oscillation of temperatures could result in micro cracking and fatigue.

4.2. EFFECTS OF HEAT OF HYDRATION ON TEMPERATURE DISTRIBUTION AND STRESSES IN PAVEMENT SLABS AT EARLY AGES

The rate of heat evolution, which depends on type of cement, cement content of the mixture, w/c ratio, and replacement levels of cement by supplementary cementitious materials, determines the maximum temperature of the concrete slab, and affects the stress development in thick concrete pavement slabs. Previous studies [40, 41] reported temperatures reaching up to 55°C in slabs within the first 24 hours of casting. Yehia et al. [40] reported that the beam (14 × 22 × 70 inches) cooled to room temperature only after 3 days of casting. The maximum temperature of the slab due to hydration is generally observed in the central region of the pavement slab [39]. With increasing thickness of the slab, the maximum temperature due to hydration also increases [39]. The high temperature due to the heat of hydration resulted in slight expansion (about 250 microstrain) of concrete beams (14 × 22 × 70 inches) at early ages (less than 3 days) [40]. The slabs which are restrained will therefore develop compressive stresses. If the slabs are thick, the heat evolved during hydration will create a temperature gradient such that the surface of the pavement will be cooler than the center or the bottom of the pavement. This results in upwards curling of the slab which will be restrained by its own weight and this will induce tensile stresses on the top surface. This, in addition to concrete shrinkage, contributes to transverse cracking of pavements prior to exposure to traffic in certain situations [38].

4.2. WPŁYW CIEPŁA HYDRATACJI NA ROZKŁAD TEMPERATURY I NAPRĘŻEŃ W PŁYTACH NAWIERZCHNI NA POCZĄTKOWYM ETAPIE TWARDNIENIA BETONU

Szybkość wydzielania ciepła, która zależy od rodzaju i zawartości cementu w mieszance betonowej, wskaźnika *w/c* oraz udziału pozaklinkierowych składników głównych cementu, determinuje maksymalną temperaturę płyty betonowej oraz wpływa na powstawanie naprężeń w grubych płytach betonowych nawierzchni. W przeprowadzonych badaniach [40, 41] odnotowano wzrost temperatury wewnątrz płyty do 55°C w ciągu pierwszych 24 godzin od zabudowania mieszanki. Yehia et al. [40] podają, że belka o wymiarach 14 × 22 × 70 cali (około 36 × 56 × 178 cm) ochłodziła się do temperatury pokojowej dopiero po trzech dniach od wylania. Maksymalną temperaturę wywołaną hydratacją cementu odnotowuje się zazwyczaj w centralnej strefie betonowej płyty nawierzchni [39]. Wraz ze wzrostem grubości płyty zwiększa się również maksymalna temperatura, do jakiej nagrzewa się beton w wyniku procesu hydratacji [39]. Wysoka temperatura wywołana wydzielaniem ciepła hydratacji w początkowym okresie (w pierwszych trzech dniach) spowodowała jedynie nieznaczne wydłużenie belek o wymiarach 14 × 22 × 70 cali, wynoszące około $250 \cdot 10^{-6}$ [40]. W płytach o ograniczonej swobodzie ruchu powyższy wzrost temperatury spowoduje powstawanie naprężeń ściskających. W płytach o większej grubości ciepło wydzielane w procesie hydratacji spowoduje powstanie różnicy temperatury między zimniejszą powierzchnią i cieplejszą strefą środkową płyty. Wynikiem takiego rozkładu temperatury będzie wyginanie krawędzi płyty ku górze, któremu zapobiega ciężar własny płyty, wywołując w ten sposób powstanie naprężeń rozciągających na górnej powierzchni. W połączeniu ze skurczem betonu powyższy mechanizm może w określonych sytuacjach przyczyniać się do powstawania spękań poprzecznych nawierzchni jeszcze przed otwarciem ich dla ruchu [38].

5. WPŁYW CYKLICZNEGO ODDZIAŁYWANIA WYSOKIEJ TEMPERATURY NA WYTRZYMAŁOŚĆ I TRWAŁOŚĆ NAWIERZCHNI LOTNISKOWYCH

Nawierzchnie lotniskowe, przynajmniej na pewnych odcinkach, narażone są na wysokie obciążenia termiczne, wywołane oddziaływanie gorących spalin wyrzucanych

5. EFFECTS OF HEAT CYCLES ON CONCRETE AIRPORT PAVEMENTS

Airfield pavements, at least at certain locations, are exposed to thermal loading from jet engine exhausts [42]. Campbell-Allen and Desai [43] studied the behavior of concrete exposed to heat cycles. They determined the effect of cycles of temperatures up to 300°C on the compressive strength, modulus of elasticity and tensile strength of concrete made of three different types of aggregates (limestone, fireclay brick, and expanded shale). Fig. 8 shows the effect of temperature cycling on the mechanical properties of limestone concrete. Overall, the physical and chemical changes occurring in concrete are accentuated by the number of cycles. For maximum temperatures of 300°C a large part of the deterioration occurs in the first 5 cycles. For thermal cycling with maximum temperature of 65°C a more progressive deterioration is observed. Limestone aggregate concrete experienced a 40% reduction in compressive strength for thermal cycling with maximum temperature of 300°C. Amongst the mechanical properties, modulus of elasticity shows the highest percentage decrease. The failure of concrete exposed to thermal cycling is gradual and accompanied by large strains [43]. The damage of airport pavements exposed to thermal loading from jet engines looked comparable to concrete degraded by freezing and thawing [44].

Airfield pavements designed for modern military aircrafts are required to resist thermal loading caused by turbine exhausts of auxillary power units of aircrafts like F/A-18, vertical takeoff and landing aircrafts such as AV-8B Harrier Jump Jet and V-22 Osprey, and vectored thrust of the next generation aircrafts. The US Navy reported scaling of concrete surface at locations where the hot exhaust gas of auxillary power unit of F/A-18 fighter jets hit the pavement. This deterioration was observed 1-2 years after the pavements went to service [44].

Pavements servicing AV-8B Harrier aircraft (vertical takeoff and landing) demonstrated explosive spalling failures. Previous researchers [45] associated the observed damage to fast increase in temperature of concrete pavements. However, pavements exposed to auxillary unit of F/A-18 demonstrate damage similar to freezing and thawing damage in concrete.

przez silniki odrzutowe [42]. Zachowanie się betonu podanego cyklicznemu oddziaływaniu wysokiej temperatury badali Campbell-Allen i Desai [43]. Określili wpływ cyklicznego oddziaływania temperatury sięgającej 300°C na właściwości betonu, takie jak wytrzymałość na ściskanie, moduł sprężystości oraz wytrzymałość na rozciąganie, przeprowadzając badania na próbkach wykonanych z mieszanki zawierających trzy różne rodzaje kruszywa (wapień, kruszywo szamotowe i łupek ekspandowany). Wpływ cyklicznego oddziaływania wysokiej temperatury na właściwości mechaniczne betonu na kruszywie wapiennym przedstawiają wykresy na Rys. 8. Zasadniczo zmiany fizyczne i chemiczne, jakim podlega beton poddany oddziaływaniu wysokiej temperatury, stają się bardziej widoczne po pewnej liczbie cykli. W przypadku maksymalnej temperatury około 300°C negatywny jej wpływ jest największy w pierwszych 5 cyklach. W przypadku obciążeń cyklicznych o maksymalnej temperaturze 65°C niszczenie ma charakter bardziej progresywny. W betonie na kruszywie wapiennym cykliczne oddziaływanie temperatury sięgającej maksymalnie 300°C spowodowało zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie o 40%. Największy spadek względny spośród wszystkich badanych właściwości mechanicznych zanotowano w przypadku modułu sprężystości. Uszkodzenia betonu poddanego cyklicznemu oddziaływaniu wysokiej temperatury następują stopniowo i towarzyszą im znaczne odkształcenia [43]. Uszkodzenia nawierzchni lotniskowych wskutek obciążeń termicznych wywołanych przez gorące spaliny z silników odrzutowych przypominają uszkodzenia wywołane cyklicznym zamrażaniem i rozmrażaniem [44].

Legend to Fig. 8 / Legenda do Rys. 8

- Limestone Concrete (Fine and Coarse) (LL3)
Beton na kruszywie wapiennym (drobnym i grubym)
- Sand, limestone concrete (LN3)
Beton z kruszywem wapiennym i piaskiem
- × Modulus of Elasticity
Moduł elastyczności
- Tensile Strength
Wytrzymałość na rozciąganie
- Compressive strength
Wytrzymałość na ściskanie

Nawierzchnie lotniskowe, które będą użytkowane przez samoloty wojskowe, muszą być przystosowane do obciążeń cieplnych wskutek spalin wyrzucanych z pomocniczych jednostek napędowych występujących w samolotach takich jak F/A-18, turbin samolotów pionowego startu i lądowania, jak AV-8B Harrier Jump Jet i V-22 Osprey oraz samolotów następnej generacji z wektorowym sterowaniem ciągu.

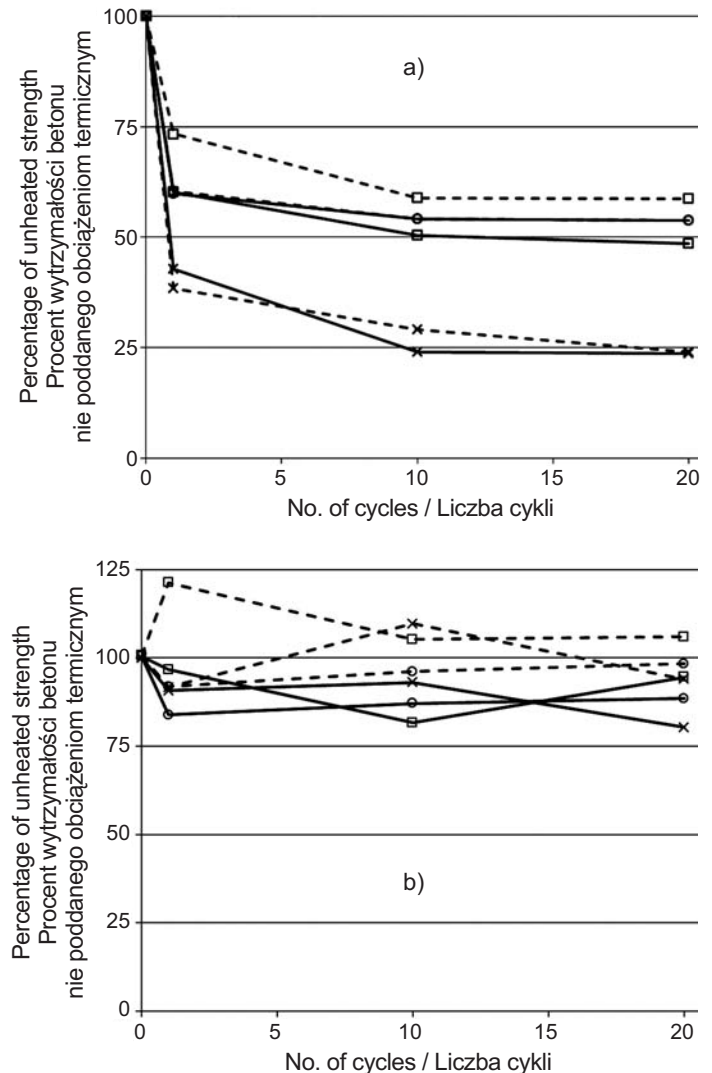


Fig. 8. Variation in compressive strength, tensile strength and modulus of elasticity of limestone concrete with temperature cycles with maximum temperature of (a) 300°C, and (b) 60°C [43]
Rys. 8. Zmiany wytrzymałości na ściskanie, wytrzymałości na rozciąganie oraz modułu sprężystości betonu na kruszywie wapiennym, poddanego cyklicznemu oddziaływaniu wysokiej temperatury: a) 300°C, b) 60°C [43]

Reprinted from Nuclear Engineering and Design, Vol. 6, No. 1, Campbell-Allen D., Desai P.M., The influence of aggregate on the behaviour of concrete at elevated temperatures, 65-77, Copyright (1967), with permission from Elsevier

The following paragraphs summarize the finding of the study conducted by Bier et al. [44] on the behavior of concrete slabs exposed to heat cycles with maximum temperatures ranging up to 205°C. Concrete slabs (water-cement ratio of 0.4) incorporating two different aggregates (quartz and limestone) were exposed to a hot air stream which simulated the exposure of a concrete pavement to the hot

Marynarka Stanów Zjednoczonych donosiła o przypadkach uszkodzeń betonu w postaci złuszczeń powierzchni w miejscach uderzeń gorących spalin z pomocniczych jednostek napędowych odrzutowego samolotu myśliwskiego F/A-18. Uszkodzenia te występowały w okresie 1-2 lat od momentu oddania nawierzchni do użytku [44].

Uszkodzenia nawierzchni użytkowanych przez samoloty pionowego startu i lądowania AV-8B Harrier miały charakter odprysków termicznych. Badacze, którzy zajmowali się tym problemem [45], przypisali je gwałtownemu wzrostowi temperatury nawierzchni betonowej. Zauważyć należy jednak, że nawierzchnie poddane oddziaływaniu spalin wyrzucanych z pomocniczych jednostek napędowych samolotu F/A-18 wykazują uszkodzenia podobne do uszkodzeń powstałych w wyniku cyklicznego zamrażania i rozmrażania.

Poniżej podsumowano wyniki przeprowadzonych przez Bier et al. badań [44], dotyczących wpływu cyklicznego oddziaływania na płyty betonowe wysokiej temperatury sięgającej 205°C. Płyty z betonu o $w/c = 0,4$, zawierającego różne rodzaje kruszywa (kwarcowe i wapienne), poddano obciążeniom termicznym wywołanym strumieniem gorącego powietrza, symulującego oddziaływanie gorących spalin wyrzucanych z pomocniczych jednostek napędowych. Na wszystkich powierzchniach za wyjątkiem jednej zainstalowano termoizolację symulując tym sposobem warunki występujące podczas eksploatacji nawierzchni. W płycie osadzono na różnych głębokościach termopary, aby monitorować gradienty temperatury wywołane cyklicznym nagrzewaniem. Po 30-minutowym nadmuchu gorącego powietrza następowało naturalne ochłodzenie płyty. W trzech pierwszych cyklach temperatura wynosiła 150°C, a w następnych trzech została zwiększona do 205°C. Zmiany temperatury w funkcji czasu, zarówno na powierzchni, jak i na różnych głębokościach w przekroju poprzecznym płyty betonowej (na kruszywie wapiennym), przedstawiono na Rys. 9. Temperatura powierzchni wzrosła do 88°C (190°F) i 107°C (225°F) przy cyklicznym ogrzewaniu do 150°C oraz do 113°C (235°F) i 135°C (275°F) przy cyklicznym ogrzewaniu do 205°C. Na głębokości 1/2 cala temperatura wynosiła od 77°C (170°F) do 88°C (190°F) oraz od 93°C (200°F) do 114°C (237°F) przy cyklicznym ogrzewaniu odpowiednio do 150°C i 205°C. Na głębokości 1 cala pod powierzchnią płyty z betonu na kruszywie wapiennym temperatura wzrosła do 63°C (145°F) i 77°C (175°F). Temperatura na spodniej stronie płyty wzrosła do odpowiednio 32°C (90°F) i 43°C (110°F) przy temperaturze badania wynoszącej 205°C osiągając ten poziom po około 30 minutach od momentu wyłączenia dmuchawy gorącego powietrza. W badaniu pośrednio wyznaczono również przepuszczalność

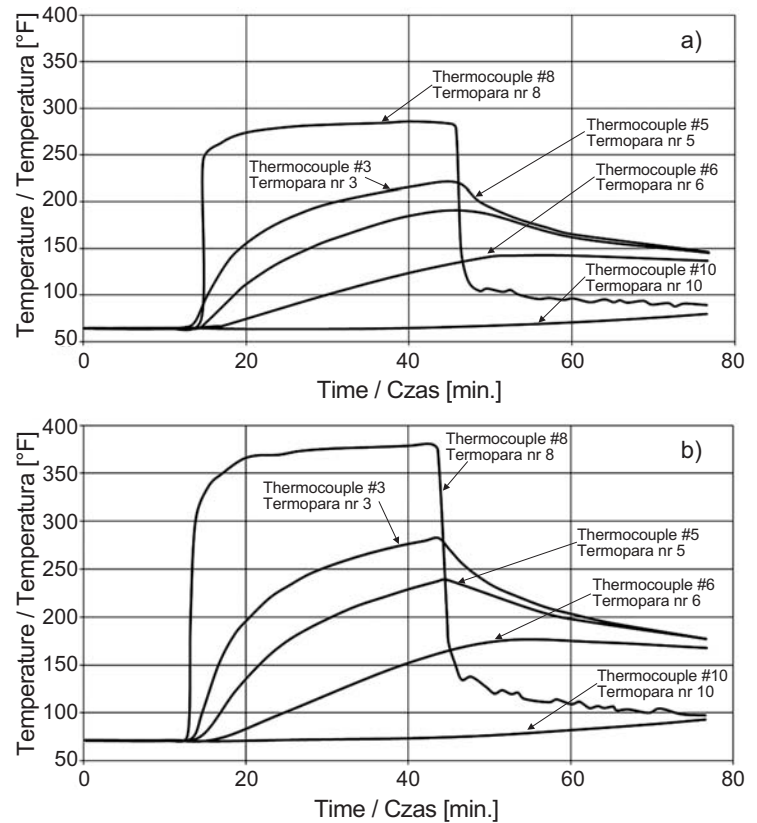


Fig. 9. Temperature above the surface (#8), at the surface (#3), 1/2 inch below surface (#5), 1 inch below surface (#6), and backside (#10) of the slab exposed to (a) 300°F, (b) 400°F [adopted from 43]
Rys. 9. Temperatura nad powierzchnią (nr 8), na powierzchni (nr 3), 1/2 cala pod powierzchnią (nr 5), 1 cal pod powierzchnią (nr 6) oraz na spodzie płyty (nr 10) przy testowym nagrzewaniu do temperatury: a) 300°F, b) 400°F [przyjęto za 43]

auxiliary power unit exhaust gases. All sides of the slab, except one, were insulated to ensure the exposure was analogous to pavements in service. Thermocouples were attached to the slab at different depths in the pavement to monitor the temperature gradients created by exposure to heat cycles. The slab was exposed to hot air for 30 minutes and then allowed to cool naturally. The first three cycles were at 150°C and the following three cycles were at 205°C. The variation of temperatures with time at the surface and various depths in the slab (made with limestone aggregates) are shown in Fig. 9. The maximum surface temperatures ranged between 88°C (190°F) and 107°C (225°F) during a 150°C cycle and between 113°C (235°F) and 135°C (275°F) during a 205°C cycle. Temperatures recorded at the depth of 1/2 inch range between 77°C (170°F) and 88°C (190°F), and 93°C (200°F) and 114°C (237°F) for 150°C and 205°C heat cycles respectively. One inch below the surface, maximum temperatures of 63°C (145°F)

powierzchniową betonu mierząc szybkość spadku podciśnienia (mm/s) wywołanego wnikiem powietrza w beton. Jak widać na Rys. 10, względny spadek podciśnienia, który pośrednio wskazuje na stopień degradacji betonu przy powierzchni, wzrasta wraz ze wzrostem liczby cykli nagrzewania, wskazując w ten sposób, że długotrwałe poddawanie powierzchni betonowej cyklicznemu oddziaływaniu wysokiej temperatury może prowadzić do uszkodzeń, takich jak powierzchniowe łuszczenie.

Bier et al. [44] przygotowali również próbki zaprawy o wskaźniku w/c równym 0,4 i wykorzystali je następnie w badaniu wpływu cyklicznego nagrzewania na wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu, wytrzymałość na ściskanie oraz skurcz. Wytrzymałość na ściskanie początkowo się zwiększa, by później zacząć spadać (Rys. 11a). Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu wykazuje tendencję malejącą wraz ze wzrostem liczby cykli nagrzewania (Rys. 11b). Zmniejszenie wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu nie jest jednak tak widoczne, jak spadek wytrzymałości na ściskanie. Pomimo ograniczenia obserwacji do 50 cykli poczynione na tym etapie obserwacje wskazują, że w przypadku kontynuowania cyklicznego nagrzewania beton byłby narażony na dalszy ubytek wytrzymałości na ściskanie i wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu. Na podstawie badań metodą porozymetrii rtęciowej stwierdzono zwiększanie wielkości porów ze wzrostem liczby cykli nagrzewania.

Ten sam zespół badaczy [44] przedstawił analityczny model wpływu wysokiej temperatury na powstawanie naprężeń w nawierzchniach betonowych. Przyjęto model materiału jednorodnego, a wartości naprężeń były obliczane przy wykorzystaniu średnich wartości mechanicznych i termicznych właściwości betonu. Uwzględniono również skurcz obliczony na podstawie wyników pomiaru dylatometrem, przeprowadzonego na próbkach zaprawy. Korzystając z opracowanego modelu stwierdzono, że cykliczne nagrzewanie do temperatury 205°C wywołuje w betonie naprężenia ściskające, sięgające 20,7 MPa. W przypadku uwzględnienia w modelu skurczu betonu powyższe naprężenia ściskające zostaną zrównoważone naprężeniami rozciągającymi. Podczas ochładzania naprężenia rozciągające, które pozostaną w betonie ze względu na trwały charakter odkształceń skurczowych, spowodują pękanie betonu. Potwierdzeniem tego jest fakt, że zaprawy charakteryzujące się największym skurczem (zmierzonym doświadczalnie przy pomocy dylatometru) charakteryzował również największy spadek wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu oraz największy wzrost wielkości porów (wyznaczony metodą porozymetrii rtęciowej).

and 77°C (175°F) were recorded for slabs with limestone aggregate. The maximum temperature on the back side of the slab ranged between 32°C (90°F) to 43°C (110°F) for slab after being exposed to 205°C heat cycle and it was achieved about 30 minutes after the blower was shut off. The surface permeability of concrete slab was indirectly measured by recording the rate of vacuum decay (mm/s) due to flow of air into concrete. As shown in Fig. 10, the relative vacuum decay, which is an indirect measure of the rate of surface degradation, increases with the number of cycles, indicating that extended exposure to thermal cycling could result in deterioration in the form of scaling.

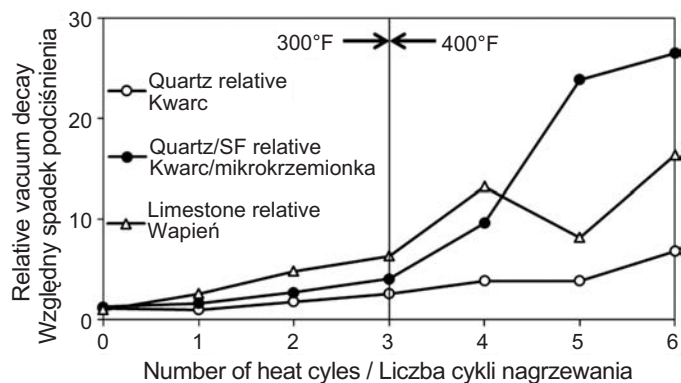


Fig. 10. Relative vacuum decay vs. number of heat cycles [adopted from 43]

Rys. 10. Względny spadek podciśnienia w zależności od liczby cykli obciążenia termicznego [przyjęto za 43]

Bier et al. [44] also prepared mortar samples with w/c ratio of 0.4 and tested them to determine the effects of thermal cycling on the flexural strength, compressive strength, and shrinkage. Compressive strength increases initially before beginning to show a downward trend (see Fig. 11a). Flexural strength shows a decreasing trend with increasing thermal cycles (as shown in Fig. 11b). However, the reduction in flexural strength with an increase in the number of thermal cycles, is more apparent than the reduction in the compressive strength. Though the data is restricted to 50 cycles, the observation indicates that concrete is susceptible to further reduction in compressive and flexural strength with exposure to thermal cycling. Mercury intrusion porosimetry (MIP) tests concluded that the microstructure coarsened with increasing heat cycles.

The same authors [44] performed analytical modeling of the effects of heat exposure on stress development in concrete pavements. These models assumed monolithic material and employed average mechanical and thermal properties of concrete to calculate stresses generated due to heat cycling.

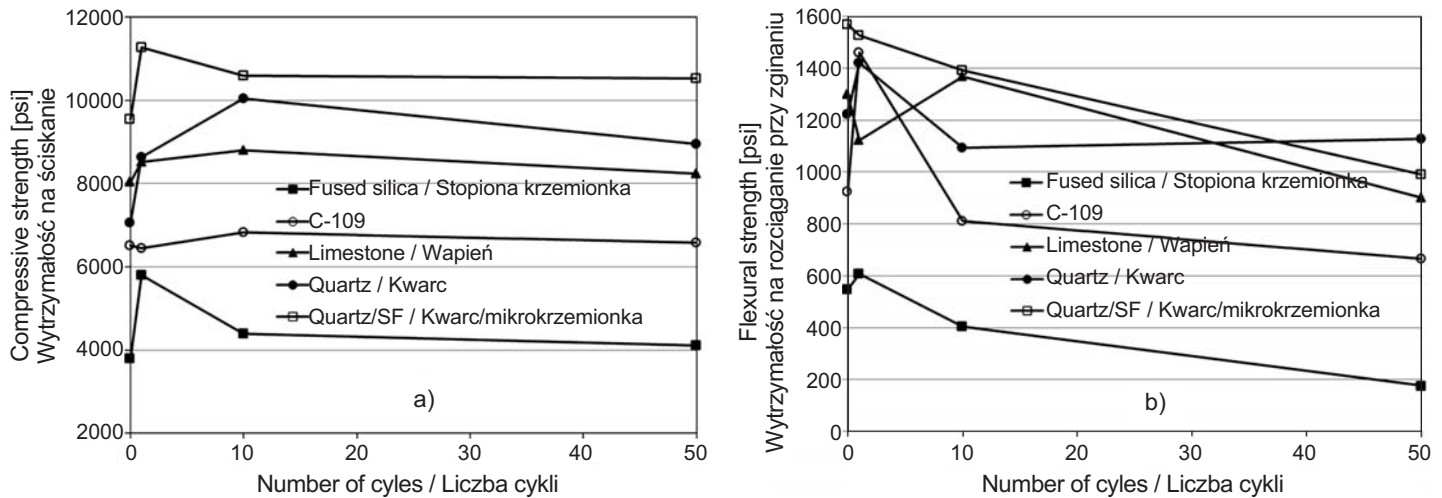


Fig. 11. Compressive strength (a) and flexural strength development (b) with heat cycling [adopted from 43]

Rys. 11. Zmiana wytrzymałości na ściskanie (a) i wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu (b) w funkcji liczby cykli nagrzewania [przyjęto za 43]

6. WNIOSKI

Przedstawiona dyskusja wpływu składu mieszanki na właściwości termiczne betonu i w konsekwencji na trwałość nawierzchni betonowych prowadzi do następujących uwag podsumowujących.

Na współczynnik przewodzenia ciepła betonu istotnie wpływa rodzaj i zawartość zastosowanego kruszywa. W stanie nasyconym beton charakteryzuje się wyższym współczynnikiem przewodzenia ciepła w porównaniu do betonu w stanie suchym, co wynika z wyższej przewodności cieplnej wody w porównaniu do powietrza. Rodzaj kruszywa i stan wilgotności betonu podobnie wpływa na współczynnik rozszerzalności cieplnej betonu. Różnice współczynnika rozszerzalności cieplnej kruszywa i matrycy cementowej odbijają się na zachowaniu się betonu poddawanego oddziaływaniom termicznym i cyklicznemu nagrzewaniu. W płytach nawierzchni sztywnych, wykonanych z betonu o niższym współczynniku rozszerzalności cieplnej, w warunkach eksploatacyjnych wskutek dobowych i sezonowych wahań temperatury będą powstawać niższe naprężenia.

Rozkład temperatury w nawierzchniach betonowych jest nieliniowy ze względu na większą podatność górnej połowy nawierzchni na gwałtowne zmiany temperatury powietrza. Ciepło powstające w płycie nawierzchni na początkowym etapie hydratacji cementu może w określonych przypadkach powodować powstawanie dużego gradientu temperatury w przekroju płyty i po ochłodzeniu betonu może się

The shrinkage values calculated from dilatometer experiment (conducted on mortar samples) were employed. The results of this modeling showed that heating to 205°C was associated with a buildup of 20.7 MPa of compressive stresses in concrete. If the model accounts for shrinkage in concrete, these compressive stresses are mitigated by tensile stresses. However, on cooling, the tensile stresses remain in concrete since the shrinkage is permanent and therefore causes concrete to crack. In short, cracking occurs in concrete during the cooling cycle. This was confirmed by the fact that the mortars which showed maximum shrinkage (determined experientially using dilatometer) also demonstrated highest loss in flexural strength and showed higher coarsening of matrix porosity (as determined by MIP technique).

6. CONCLUSIONS

Presented discussion summarized the effects of concrete mixture design on the thermal properties of concrete and on the implications changes in these properties have on the durability of concrete pavements.

The aggregate volume fraction and type have a significant influence on the thermal conductivity of concrete. Concrete, when saturated, demonstrates higher thermal conductivity compared to dry concrete since the conductivity of water is higher than that of air. Similar to thermal conductivity, CTE of concrete also depends significantly on the type of aggregate and its moisture state. The difference between the coefficient of thermal expansion of aggregates

uwidocznic w postaci spękań poprzecznych. Wystawienie powierzchni betonu na cykliczne oddziaływanie wysokiej temperatury ($> 65^{\circ}\text{C}$) może powodować uszkodzenia w postaci złuszczeń powierzchniowych, podobnych do obserwowanych w wyniku naprzemiennego zamrażania i rozmrażania.

INFORMACJE DODATKOWE

Artykuł powstał podczas pracy drugiego spośród współautorów na Uniwersytecie Purdue w USA w roku akademickim 2013/2014 na stanowisku profesora wizytującego, ufundowanego w ramach programu Edward M. Curtis Visiting Professorship.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, 1986
- [2] Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide – A Manual of Practice. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, 2008
- [3] ASTM C177-13 Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate. ASTM International, West Conshohocken, 2013
- [4] ASTM C1045-07 Standard Practice for Calculating Thermal Transmission Properties Under Steady-State Conditions. ASTM International, West Conshohocken, 2013
- [5] ASTM C518-10 Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus. ASTM International, West Conshohocken, 2010
- [6] ASTM E1530-11 Standard Test Method for Evaluating the Resistance to Thermal Transmission of Materials by the Guarded Heat Flow Meter Technique. ASTM International, West Conshohocken, 2011
- [7] ASTM E1952-11 Standard Test Method for Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity by Modulated Temperature Differential Scanning Calorimetry. ASTM International, West Conshohocken, 2011
- [8] AASHTO T336-11. Coefficient of Thermal Expansion of Hydraulic Cement Concrete. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, 2011
- [9] AASHTO TP60-00. Coefficient of Thermal Expansion of Hydraulic Cement Concrete. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, 2000
- [10] ASTM C531-00 Standard Test Method for Linear Shrinkage and Coefficient of Thermal Expansion of Chemical-Resistant Mortars, Grouts, Monolithic Surfacing, and Polymer Concretes. ASTM International, West Conshohocken, 2000
- [11] ASTM C490-11 Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete. ASTM International, West Conshohocken, 2011
- [12] ASTM D4611-08 Standard Test Method for Specific Heat of Rock and Soil. ASTM International, West Conshohocken, 2008
- [13] ASTM D2766-95 Standard Test Method for Specific Heat of Liquids and Solids. ASTM International, West Conshohocken, 1995
- [14] Zhang Y., Sun W., Liu S.: Study on the hydration heat of binder paste in high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, **32**, 9, 2002, 1483-1488
- [15] Nocuń-Wczelik W.: Heat evolution in hydrated cementitious systems admixed with fly ash. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **65**, 2, 2001, 613-619

and paste matrix determines the behavior of concrete exposed to thermal loading and heat cycles. A rigid pavement made of concrete with lower CTE will experience lower stresses when in service due to diurnal and seasonal temperature fluctuations.

The thermal gradients in concrete pavements are non-linear in nature with the top half of the pavement being more susceptible to changes with drastic variations in air temperature. The heat generated in concrete pavements during cement hydration can, in certain cases, create a thermal gradient across the cross section of the pavement slab which can manifest itself as transverse cracking upon cooling. Exposure of concrete pavements to high temperature cyclic loading ($> 65^{\circ}\text{C}$) can cause spalling of concrete similar to what is observed during freezing thawing exposure.

ACKNOWLEDGEMENT

Edward M. Curtis Visiting Professorship at Purdue University, USA during 2013/2014 is gratefully acknowledged by the second author.

- [16] *Knor G., Glinicki M.A., Holnicki-Szulc J.*: Determination of thermal parameters of hardening concrete by means of inverse problem solution. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **11**, 4, 2012, 281-294
- [17] *Knor G., Glinicki M.A., Holnicki-Szulc J., Ossowski A., Ranachowski Z.*: Influence of calcareous fly ash on the temperature of concrete in massive elements during the first 72 hours of hardening. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **12**, 1, 2013, 113-126
- [18] U.S. Bureau of Reclamation, *Concrete Manual*, 8th edition, 1988
- [18] *Ghafoori N., Diawara H.*: Influence of temperature on fresh performance of self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*, **24**, 6, 2010, 946-955
- [20] *Neville A.M.*: Properties of concrete. Fourth Edition John Wiley & Sons, Inc., New York, 1997
- [21] *Mackiewicz P.*: Thermal stress analysis of jointed plane in concrete pavements. *Applied Thermal Engineering*, **73**, 1, 2014, 1167-1174
- [22] *Siwińska A., Garbalińska H.*: Thermal conductivity coefficient of cement based mortars as air relative humidity function. *Heat and Mass Transfer*, **47**, 9, 2011, 1077-1087
- [23] *Kim K.H., Jeon S.E., Kim J.K., Yang S.*: An experimental study on thermal conductivity of concrete. *Cement and Concrete Research*, **33**, 3, 2003, 363-371
- [24] *Jerman M., Keppert M., Výborný J., Černý R.*: Hygric, thermal and durability properties of autoclaved aerated concrete. *Construction and Building Materials*, **41**, 1, 2013, 352-359
- [25] *Panesar D.K., Shindman B.*: The mechanical, transport and thermal properties of mortar and concrete containing waste cork. *Cement and Concrete Composites*, **34**, 9, 2012, 982-992
- [26] *Kim H.K., Jeon J.H., Lee H.K.*: Workability, and mechanical, acoustic and thermal properties of lightweight aggregate concrete with a high volume of entrained air. *Construction and Building Materials*, **29**, 2012, 193-200
- [27] *Khaliq W., Kodur V.*: Thermal and mechanical properties of fiber reinforced high performance self-consolidating concrete at elevated temperatures. *Cement and Concrete Research*, **41**, 11, 2011, 1112-1122
- [28] *Loser R., Münch B., Lura P.*: A volumetric technique for measuring the coefficient of thermal expansion of hardening cement paste and mortar. *Cement and Concrete Research*, **40**, 7, 2010, 1138-1147
- [29] *Sellevoid E.J., Bjøntegaard Ø.*: Coefficient of thermal expansion of cement paste and concrete: Mechanisms of moisture interaction. *Materials and Structures*, **39**, 9, 2006, 809-815
- [30] *Rajabipour F., Weiss J.*: Electrical conductivity of drying cement paste. *Materials and Structures*, **40**, 10, 2006, 1143-1160
- [31] *Bjøntegaard O., Sellevoid E.J.*: Interaction between thermal dilation and autogenous deformation in high performance concrete. *Materials and Structures*, **34**, 5, 2001, 266-272
- [32] *Yeon J.H., Choi S., Won M.C.*: In situ measurement of coefficient of thermal expansion in hardening concrete and its effect on thermal stress development. *Construction and Building Materials*, **38**, 2013, 306-315
- [33] *Fu X., Chung D.D.L.*: Effects of silica fume, latex, methylcellulose, and carbon fibers on the thermal conductivity and specific heat of cement paste. *Cement and Concrete Research*, **27**, 12, 1997, 1799-1804
- [34] *Zhang D., Li Z., Zhou J., Wu K.*: Development of thermal energy storage concrete. *Cement and Concrete Research*, **34**, 6, 2004, 927-934
- [35] *Pomianowski M., Heiselberg P., Jensen R.L., Cheng R., Zhang Y.*: A new experimental method to determine specific heat capacity of inhomogeneous concrete material with incorporated microencapsulated-PCM. *Cement and Concrete Research*, **55**, 2014, 22-34
- [36] *Kodide U., Shin A.H.*: Effects of thermal properties on temperature and moisture profiles, and the performance of PCC pavements. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, **6**, 12, 2011, 88-96
- [37] *Chung Y.*: Thermal stress analysis of jointed plain concrete pavements containing fly ash and slag. PhD Thesis, Louisiana State University, 2012
- [38] *Nantung T.*: High Performance Concrete Pavement in Indiana. Joint Transportation Research Program, SPR-2642, Report No. FHWA/IN/JTRP-2011/20, 2011
- [39] *Zhu B.*: Thermal Stresses in Fixed Slab or Free Slab, in: *Thermal Stresses and Temperature Control of Mass Concrete*. Tsinghua University Press, 2014, 121-142
- [40] *Yehia S., Landolsi T., Hassan M., Hallal M.*: Monitoring of strain induced by heat of hydration, cyclic and dynamic loads in concrete structures using fiber-optics sensors. *Measurement*, **52**, 2014, 33-46
- [41] *Zou X., Chao A., Tian Y., Wu N., Zhang H., Yu T.Y., Wang X.*: An experimental study on the concrete hydration process using Fabry-Perot fiber optic temperature sensors. *Measurement*, **45**, 5, 2012, 1077-1082
- [42] *Linek M., Nita P.*: Thermal effects on airfield surfaces. 9-th European conference of young research and scientific workers. University of Žilina, Slovak Republic, Transcom 2011, **7**, 2011, 85-88

- [43] Campbell-Allen D., *Desai P.M.*: The influence of aggregate on the behaviour of concrete at elevated temperatures. *Nuclear Engineering and Design*, **6**, 1, 1967, 65-77
- [44] *Bier T.A., Wise S., Chang P.*: A mechanistic study of failure of concrete subjected to cyclic thermal loads. Naval Civil Engineering Laboratory, CR 91.008, Port Hueneme, CA 93043, USA, 1991
- [45] *Sullivan P.J., Poucher M.P.*: The influence of temperature on the physical properties of concrete and mortar in the range 20°C to 400°C. American Concrete Institute Special Publication, **25**, 1971, 103-136