

Mieczysław LEŚKO, Mirosław KOTASIŃSKI

## NAPRĘŻENIA TERMICZNE W NAWIERZCHNIACH BETONOWYCH WYWOŁYWANE CIEPŁEM HYDRATAcji CEMENTU

**Streszczenie.** W opracowaniu określono wielkość maksymalnego przyrostu temperatury nawierzchni z betonu cementowego w wyniku procesu hydratacji cementu oraz czas maksymalnego wydzielania ciepła hydratacji dla klimatu polskiego. Wymienione czynniki mają istotny wpływ na awaryjność nawierzchni drogowych i lotniskowych z betonu cementowego układanych w wysokich temperaturach otaczającego powietrza.

## THERMAL STRESSES IN CONCRETE PAVEMENTS EVOKED BY THE CEMENT HYDRATION HEAT

**Summary.** This study concerns the maximum rise of the cement concrete pavement temperature as a result of the cement hydration and the time of the maximum hydration heat emission for the Polish climate. The factors mentioned above essentially influence the failure frequency of the road and airport surfaces made of cement concrete laid in high temperatures of the ambient air.

## TEMPERATURSPANNUNGEN IN ZEMENTBETONDECKEN STAMMENDEN VON ZEMENTHYDRATIONSWÄRME

**Zusammenfassung.** In diesem Artikel die folgende Grösse bestimmt werden: maximaler Temperaturzuwachs in Zementbetondecke, der aus Hydrationsprozesse folgt und die Zeit der maximalen Ausscheidung der Hydrationswärme in polnischem Klima. Die erwähnten faktoren beeinflussen wesentlich auf Havariezustand der Strassen - und Flugfelddecken, die bei hoher Lufttemperatur ausgeführt werden.

## 1. WSTĘP

Obciążenia termiczne w danej strefie nawierzchni, wynikające z nakładania się pól temperatur zmiennych w czasie i przestrzeni, są jedną z podstawowych przyczyn powstawania naprężeń w nawierzchniach z betonu cementowego.

W nawierzchniach drogowych i lotniskowych z betonu cementowego można wyróżnić następujące rodzaje obciążeń termicznych:

- wywołane ciepłem hydratacji cementu,
- spowodowane czynnikami klimatycznymi (dobowe, miesięczne, roczne zmiany temperatury otaczającego powietrza, radiacja słoneczna, opady atmosferyczne, wiatr, itp.),
- spowodowane gazami startowymi silników odrzutowych statków powietrznych.

Obciążenia termiczne występują już od pierwszych godzin po ułożeniu mieszanki betonowej, a wywołane przez nie naprężenia termiczne mają zasadnicze znaczenie w zachowaniu się całej konstrukcji nawierzchni.

## 2. OBCIĄŻENIA TERMICZNE WEWNĘTRZNE

Świeżo ułożona nawierzchnia z betonu cementowego, nie mająca jeszcze odpowiedniej wytrzymałości, nie zawsze jest zdolna do kompensowania sił pochodzących od obciążeń wewnętrznymi źródłami ciepła. Po ułożeniu nawierzchni (po kilku godzinach) mogą wystąpić widoczne skutki działania tych obciążeń w postaci rys termicznych.

Przyczyną naprężeń termicznych wywołanych czynnikami wewnętrznymi są procesy chemiczne, a w szczególności uwodnienie cementu zachodzące wewnątrz nawierzchni. Hydratacja składników cementu ma charakter egzotermiczny. Z praktycznego punktu widzenia nie jest ważna ilość wydzielonego ciepła hydratacji, lecz wpływ tego ciepła na przyrost temperatury nawierzchni.

### 2.1. Temperatura hydratacji

Wielkość maksymalnego przyrostu temperatury nawierzchni z betonu cementowego w wyniku procesów chemicznych zachodzących w jej wnętrzu można określić zależnością [1,2]:

$$\Delta t_h^{\max} = [1 - \exp(-m \cdot \Delta \tau_d)] \cdot [B \cdot C / S \cdot \gamma], \quad (1)$$

gdzie:

$\Delta t_h^{\max}$  - maksymalny przyrost temperatury nawierzchni z betonu cementowego pod wpływem wydzielania ciepła hydratacji,  $^{\circ}\text{C}$ ,

$m = 0,01$  - parametr,  $\text{h}^{-1}$ ,

$\Delta \tau_d$  - maksymalny czas wydzielania ciepła hydratacji od momentu ułożenia nawierzchni do chwili maksymalnego wzrostu ilości wydzielanego ciepła hydratacji,  $\text{h}$ ,

$B$  - parametr zależny od marki cementu, dla cementów portlandzkich marek 60, 50, 40 i 30 odpowiednio  $B = 356, 318, 251, 188$ ,

$C$  - właściwa pojemność cieplna betonu cementowego; dla dróg i lotnisk przyjmuje się  $C = 0,95 \text{ kJ/ kg}^{\circ}\text{C}$ ,

$\gamma$  - gęstość betonu cementowego,  $\text{kg/m}^3$ ,

$S$  - ilość cementu w mieszance betonowej,  $\text{kg/m}^3$ .

## 2.2. Czas wydzielania ciepła hydratacji

Czas maksymalnego wydzielania ciepła hydratacji zależy od temperatury układanej mieszanki betonowej oraz grubości płyty nawierzchniowej [1,2]:

$$\Delta \tau_d = 17,12 [2^{0,1 \cdot (t_m - 15)}]^{-1} \cdot \exp(0,5h), \quad (2)$$

$$t_m = 8 (1 + 0,1t_0), \quad (3)$$

gdzie:

$t_m$  - temperatura układanej mieszanki betonowej, którą z dokładnością do  $5^{\circ}\text{C}$  oblicza się ze wzoru (3),

$h$  - grubość płyty nawierzchni,  $\text{m}$ ,

$t_0$  - temperatura otaczającego powietrza,  $^{\circ}\text{C}$ .

Na rys. 1 przedstawiono wykresy zależności czasu maksymalnego wydzielania ciepła hydratacji od temperatury otaczającego powietrza dla różnych płyt nawierzchni z betonu

cementowego. Można zauważyć skrócenie czasu maksymalnego wydzielania ciepła hydratacji wraz ze wzrostem temperatury otaczającego powietrza oraz zmniejszeniem grubości płyty nawierzchni.

Tempo wzrostu ciepła hydratacji ma duże znaczenie praktyczne, ponieważ ta sama ilość ciepła wydzielona w dłuższym okresie może ulec w znacznej mierze rozproszeniu, z czym wiąże się mniejszy przyrost temperatury nawierzchni.

Bezpośredni wpływ na rozwój procesów egzotermicznych w nawierzchni z betonu cementowego ma temperatura samej nawierzchni, a jej przyrost w procesie hydratacji cementu  $\Delta t_h^{\max}$  uwzględnia się za pomocą współczynnika  $\eta_t$  [1,2]:

$$\eta_t = [2^{0,1(15-20)}]^{-1} \cdot 2^{0,1(t_0-20)} = 2^{0,1 \cdot (t_0-20) + 0,5} \quad (4)$$

Ostateczną zależność na wielkość  $\Delta t_h$  można przedstawić w postaci:

$$\Delta t_h^{\max} = [1 - \exp \cdot (-m \cdot \Delta \tau_d)] \cdot [(B \cdot C) / (S \cdot \gamma)] \cdot \eta_p \quad (5)$$

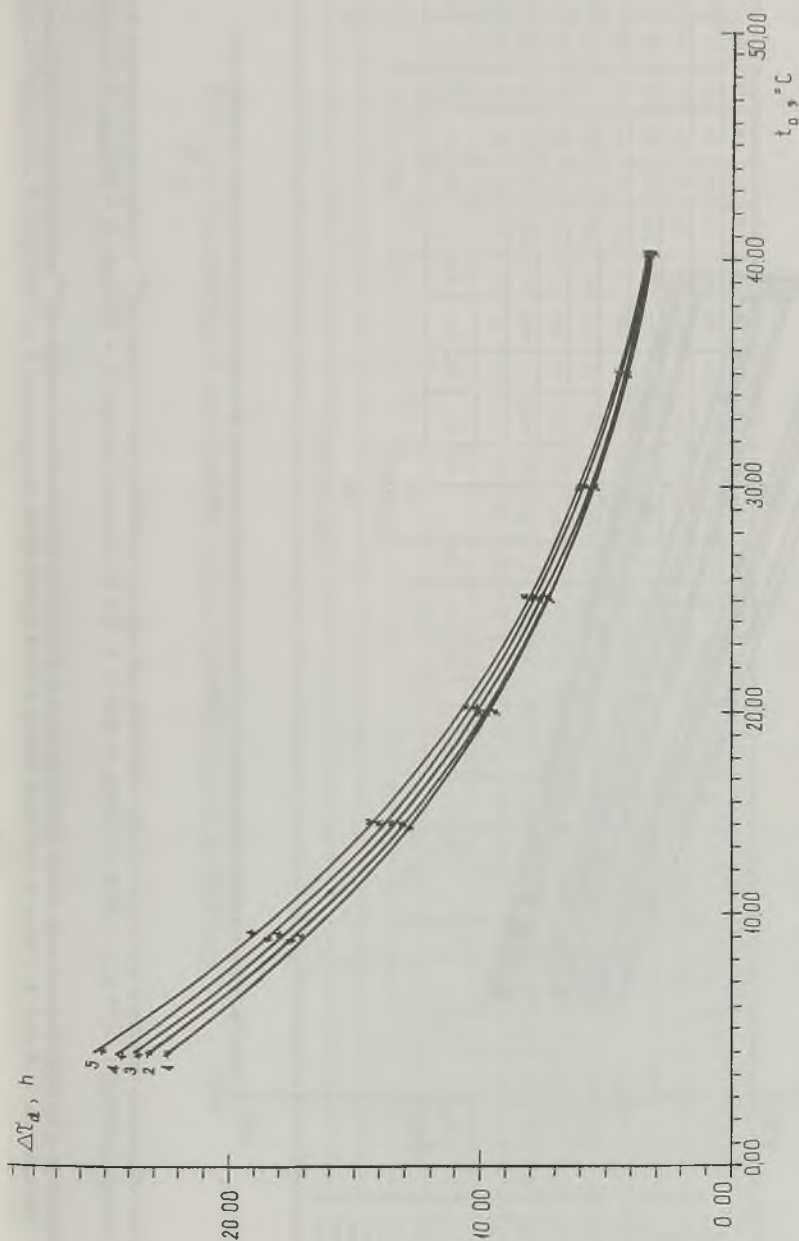
Na podstawie zależności (5) obliczono  $\Delta t_h^{\max}$  dla różnych temperatur otaczającego powietrza i grubości płyt wykonanych z betonu cementowego o zawartości cementu drogowego marki "45": 250, 300 oraz 350 kg/m<sup>3</sup>. Wyniki zestawiono w tablicy 1 oraz przedstawiono na rys. 2.

Z tablicy i rysunku wynika, że wraz ze wzrostem temperatury otaczającego powietrza i zawartości cementu w mieszance betonowej wyraźnie wzrasta  $\Delta t_h^{\max}$ . Na wzrost temperatury hydratacji w niewielkim stopniu wpływa zwiększenie grubości płyt nawierzchni (przy zwiększeniu grubości o 0,05 m temperatura hydratacji wzrasta o 0,1-0,2°C).

### 3. PODSUMOWANIE

Znajomość temperatury hydratacji twardniejącego betonu cementowego w nawierzchniach drogowych i lotniskowych jest istotna z dwóch powodów:

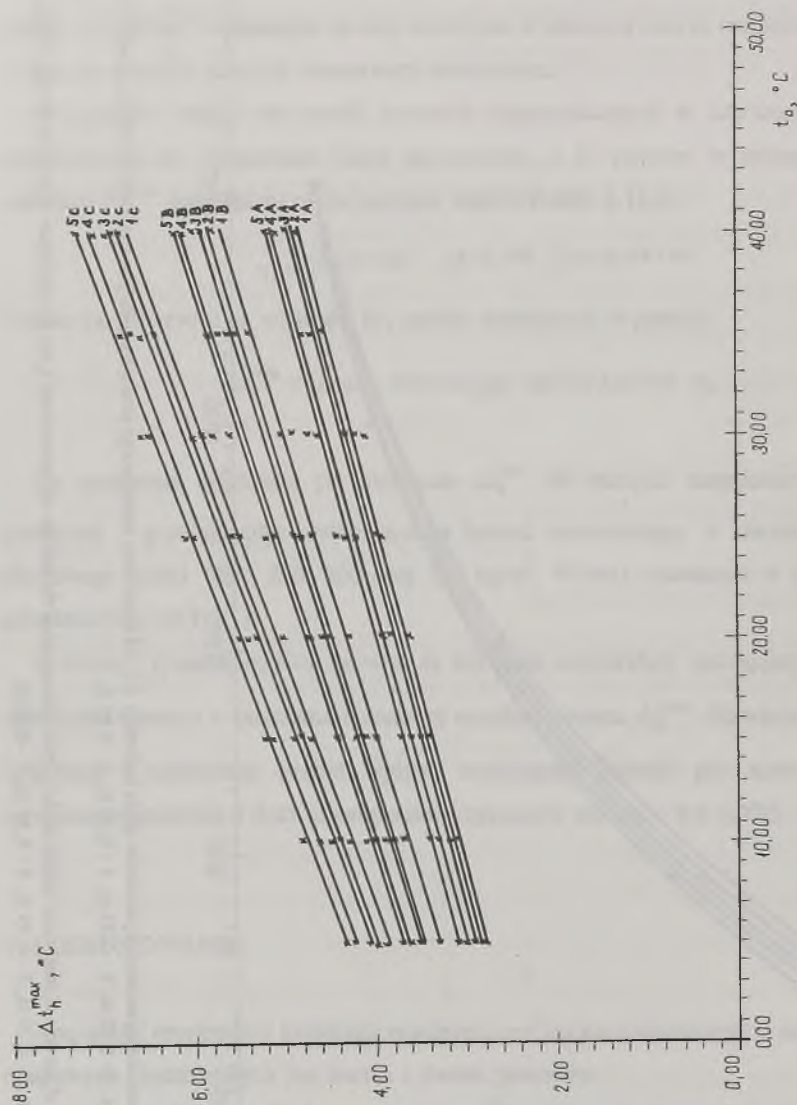
- na etapie projektowania i wykonawstwa pozwala podjąć odpowiednie zabiegi eliminujące powstanie rys termicznych,



Rys. 1. Zależność czasu maksymalnego wydzielenia ciepła hydratacji  $\Delta T_d$  od temperatury otaczającego powietrza  $t_0$  dla płyt nawierzchni z betonu cementowego o grubości:  
 1 - 0,15 m, 2 - 0,20 m, 3 - 0,25 m, 4 - 0,30 m, 5 - 0,35 m

Fig. 1. Dependence of the time of maximum hydration  $\Delta T_d$  heat emission upon the ambient air temperature  $t_0$  for the pavement slabs made of cement concrete which are:  
 1 - 0,15 m, 2 - 0,20 m, 3 - 0,25 m, 4 - 0,30 m, 5 - 0,35 m





Rys. 2. Zależność przyrostu temperatury nawierzchni z betonu cementowego pod wpływem wydzielania ciepła hydratacji  $\Delta t_h^{\max}$  od temperatury otaczającego powietrza  $t$  dla płyt o grubości: 1 - 0,15 m, 2 - 0,20 m, 3 - 0,25 m, 4 - 0,30 m, 5 - 0,35 m i zawartości cementu: A = 250 kg/m<sup>3</sup>, B = 300 kg/m<sup>3</sup>, C = 350 kg/m<sup>3</sup>

Fig. 2. Dependence of the temperature rise in the cement concrete pavement as influenced by the hydration heat emission  $\Delta t_h^{\max}$  upon the ambient air temperature  $t$  for the slabs which are: 1 - 0,15 m, 2 - 0,20 m, 3 - 0,25 m, 4 - 0,30 m, 5 - 0,35 m thick and the cement content is: A = 250 kg/m<sup>3</sup>, B = 300 kg/m<sup>3</sup>, C = 350 kg/m<sup>3</sup>



- umożliwia dokładne określenie temperatury twardniejącego betonu cementowego w celu wyznaczenia czasu, w którym należy wykonać szczeliny skurczowe i rozszerzenia.

Wielkość odkształceń i naprężeń wywołanych ciepłem hydratacji cementu można regulować:

- odpowiednim doбором cementu o niskiej kaloryczności i małym skurczu; wymagania te spełnia cement drogowy "40" z cementowni Małogoszcz,
- zmniejszeniem ilości cementu w mieszance betonowej przy zachowaniu parametrów wytrzymałościowych nawierzchni,
- stosowaniem kruszywa charakteryzującego się dużą pojemnością i przewodnością cieplną oraz małą rozszerzalnością termiczną,
- obniżeniem początkowej temperatury mieszanki betonowej,
- odpowiednio wczesnym wykonaniem szczelin skurczowych i rozszerzania,
- pielęgnacja powierzchni płyt nawierzchni, polegająca na niedopuszczeniu, w przypadku wysokich temperatur otaczającego powietrza, do ogrzania powierzchni płyt promieniowaniem słonecznym,
- odpowiednim doбором grubości nawierzchni.

Z uwagi na to, że ciepło hydratacji i związane z nim naprężenia są najbardziej intensywne w początkowym okresie twardnienia betonu cementowego, szczególnego znaczenia nabiera odpowiednia pielęgnacja świeżo ułożonej nawierzchni, tj. zabezpieczenie jej powierzchni warstwą piasku, matami lub innymi materiałami izolacyjnymi przed nagraniem promieniami słonecznymi.

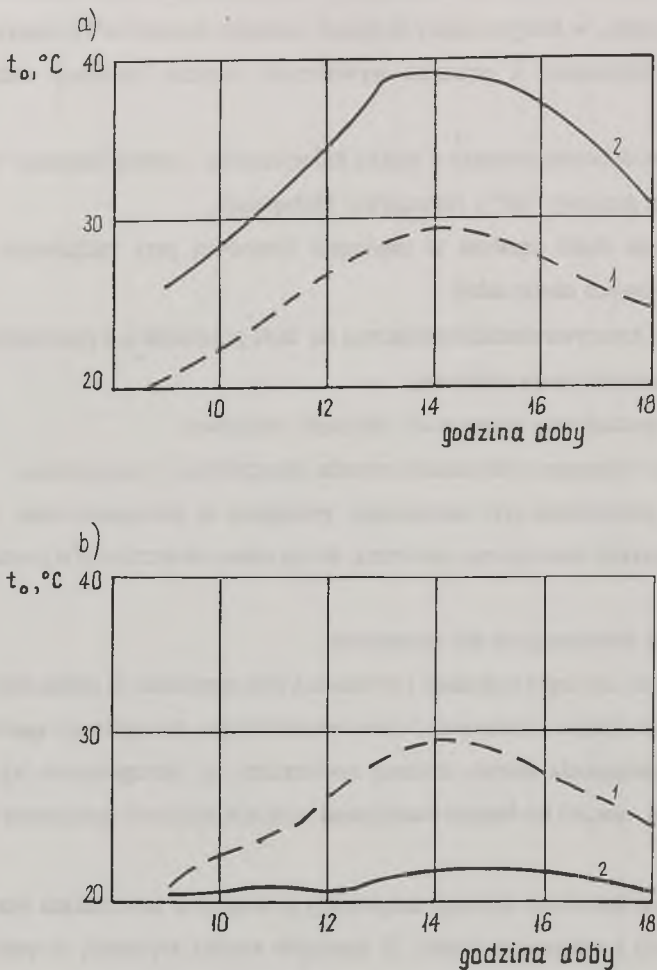
Na rys.3 przedstawiono wykresy temperatury powierzchni nawierzchni bez warstwy i z warstwą izolacji z wilgotnego piasku. Z rysunków wynika wyraźnie, że przy stosowaniu warstwy izolacyjnej następuje obniżenie temperatury powierzchni płyt.

Z uwagi na ciepło hydratacji wymagana grubość warstwy izolacji termicznej wynosi [1]:

$$h_i = K_i \frac{h(\Delta t_a - \Delta t_{a dop})}{2 \cdot \Delta t_{a dop}}, \quad (6)$$

$$K_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_b} \quad (7)$$



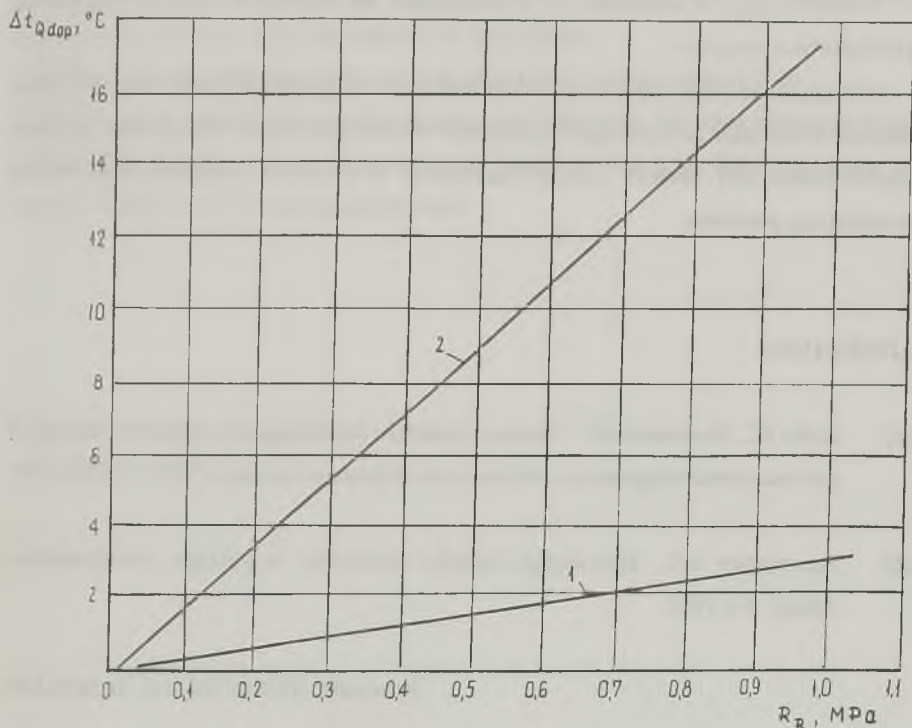


Rys.3. Zależność temperatury powierzchni płyt nawierzchni z betonu cementowego od temperatury otaczającego powietrza:

- a) bez warstwy izolacji,
- b) z warstwą izolacji z wilgotnego piasku o gr. 4 cm
- 1 - temperatura otaczającego powietrza,
- 2 - temperatura powierzchni płyt nawierzchni

Fig.3. Dependence of the cement concrete pavement slabs surface temperature upon the ambient air temperature:

- a) without any insulation layers
- b) with the wet sand insulation which is 4 cm thick
- 1 - ambient air temperature
- 2 - pavement slabs surface temperature



Rys.4. Zależność dopuszczalnej różnicy temperatury powierzchniowej nawierzchni i otaczającego powietrza  $\Delta t_{q\text{ dop}}$ , przy której nie nastąpi zarysowanie nawierzchni od wytrzymałości betonu cementowego na rozciąganie  $R_R$

1 -  $E_b = 5000$  MPa, 2 -  $E_b = 10000$  MPa

Fig.4. Dependence of acceptable temperature difference of the pavement surface and the ambient air  $\Delta t_{q\text{ dop}}$ , which will not result in any surface scratches, upon the cement concrete resistance to stretching  $R_R$

1 -  $E_b = 5000$  MPa, 2 -  $E_b = 10000$  MPa

gdzie:

$h_i$  - wymagana grubość warstwy izolacji, w m,

$\Delta t_\alpha$  - różnica temperatury powierzchniowej nawierzchni i otaczającego powietrza,

$\Delta t_{\alpha \text{ dop}}$  - dopuszczalna różnica temperatury powierzchniowej nawierzchni i otaczającego powietrza, przy której nie nastąpi zarysowanie nawierzchni,

$\lambda_i, \lambda_b$  - współczynniki przewodności cieplnej warstwy izolacyjnej i betonu cementowego.

Wartości  $\Delta t_{\alpha \text{ dop}}$  w zależności od wytrzymałości na rozciąganie betonu cementowego przedstawiono na rys.4.

Izolacje powierzchni nawierzchni należy wykonać w odpowiedniej porze dnia. Nie należy dopuścić do ogrzania powierzchni płyt promieniowaniem słonecznym i do wytworzenia efektu cieplarnianego pod warstwą izolacji, szczególnie w wysokich dodatnich temperaturach otaczającego powietrza.

## LITERATURA

- [1] Leśko M., Kotasiński M.: "Analiza czynników wpływających na powstawanie rys w nawierzchniach drogowych i lotniskowych z betonu cementowego" BW-73/3/RB-3/94.
- [2] Ponomarjew I.N.: Egzotermija bietonu, ułożennogo w pokrytia. Awtomobilnyje dorogi. 5-6 1992.

Recenzent: Prof.dr hab.inż. Tadeusz Hop

Wpłynęło do Redakcji: 22.05. 1995 r.

## Abstract

Thermal load evoked by external factors appear even in the first hours after the concrete has been laid. If the thermal stresses are not taken into account the result may be the increased failure frequency in the road and airport pavements made of cement concrete.

Freshly laid cement concrete pavement is not always capable of compensating forces evoked by the internal heat sources load (concrete hydration heat). After the pavement has been laid (after a few hours) some thermal scratches may appear as a result of the load.

In this study the following factors have been discussed:

- dependence of the time of maximum hydration heat emission upon the ambient air temperature for the pavement slabs of various thickness,
- dependence of the temperature rise in cement concrete pavement when influenced by the hydration heat emission upon the ambient air temperature,
- influence of sand insulation on the surface temperature of the pavement slabs,
- influence of temperature and concrete resistance on the scratch resistance of the pavement.

This study presents a range of methods which allow to reduce the deformation size and stresses caused by the cement hydration heat.