



PAWEŁ MIECZKOWSKI

Zachodniopomorski
Uniwersytet
Technologiczny
Eurovia Polska S.A.,
Grupa VINCI

Krawędzie warstw z mieszank mineralno-asfaltowych – problem zagęszczania w technologii na gorąco

Kształtowanie właściwości fizyczno-wytrzymałościowych mieszank mineralno-asfaltowych w technologii na gorąco odbywa się podczas ich zagęszczania. Aby proces ten był efektywny, powinien przebiegać w odpowiednich zakresach temperatury w budowywania mma. Odpowiadające temu zakresy temperatury są wa-

runkowane lepkością lepiszcza asfaltowego (2–20 Pa·s). Jednorodna lepkość asfaltu w warstwie stwarzałaby w tej sytuacji idealne warunki przebiegu omawianego procesu. Niestety, gorąca warstwa w obszarach kontaktu z czynnikami pobierającymi ciepło (krawędzie, powierzchnia dolna i górna) zdecydowanie szybciej podlega wyziębieniu, co komplikuje zagęszczanie i stwarza warunki do powstawania nieprawidłowości.

Proces zagęszczania *in situ* (na drodze) jest dwuetapowy. Wstępne zagęszczenie nadaje mieszankom rozkładarka, a dokładnie jej deski rozkładające połączone z systemem ubijaków. Ubijaki, pracujące oscylacyjnie lub pionowo z określoną amplitudą i częstotliwością (zależnie od grubości warstwy i rodzaju mma), ułatwiają przepływ materiału pod płytą dolną deski. Ciężar deski oraz możliwość pracy wibracyjnej powinny zapewnić uzyskanie określonego poziomu zagęszczenia. Deski (stoły) rozkładarek są wyposażone w system ogrzewania, pozwalający utrzymać (a nawet podnieść) temperaturę mma, szczególnie w warstwie przypowierzchniowej. Ta właśnie część warstwy w pierwszej kolejności podlega oziębieniu, szczególnie przy niesprzyjających warunkach w budowywania (np. silny wiatr). System ogrzewania poprawia zatem efektywność pracy stołów oraz jednorodność powierzchniową mieszanki. Zapobiega to również przyklejaniu się mieszanki do spodniej powierzchni stołu, podczas jego przesuwania. Utrzymanie na stałym poziomie temperatury w budowywanej mieszanki mineralno-asfaltowej oraz jednostajna praca rozkładarki pozwalają uzyskać w miarę równomierne zagęszczenie (wstępne) w przekroju warstwy. Oczywiście, mogą pojawić się zawirowania w wartościach tego parametru, uzależnione od stanu powierzchni, na której rozkładana jest mma. W niekorzystnych warunkach (np. woda w podłożu), uzyskanie wymaganego zagęszczenia w dolnej części w budowywanej warstwy może okazać się niemożliwe. Szybkie wychłodzenie mieszanki i wzrost lepkości lepiszcza asfaltowego są w takim przypadku przeszkodą, która uniemożliwia osiągnięcie pożądanego celu.

Końcowe zagęszczenie mieszank jest kształtowane poprzez walce. O ile w trakcie pracy rozkładarki czynniki klimatyczno-pogodowe nie odgrywają aż tak ważnej roli w kształtowaniu struktury mieszanki tam się znajdującej, tak w dalszym etapie ich znaczenie wzrasta (w niektórych przypadkach jest decydujące). Do nich powinna być dostosowana specyfika pracy walców, powiązana oczywiście z ich ilością i rodza-

jem oraz grubością i szerokością warstwy, a także prędkością pracy rozkładarki. Wpływ poszczególnych czynników na prędkość wychładzania mma, a tym samym i czas efektywnego zagęszczenia, zostały dosyć szczegółowo omówione w [1–5]. W publikacjach tych nie uwzględniono jednak wpływu krawędzi warstwy, w obrębie której wymiana ciepła odbywa się w dwóch kierunkach. To przekłada się bezpośrednio na szybsze wyziębienie mieszanki w tych obszarach. Skutkiem tego mogą być trudności w osiągnięciu wymaganych wskaźników zagęszczenia, a w dalszej kolejności pojawiające się ubytki w nawierzchni (fot. 1–2). Aby uniknąć tego typu komplikacji przebieg tego zjawiska powinien znaleźć swoje odzwierciedlenie w pracy maszyn zagęszczających, co pozwala na odpowiednie ukształtowanie struktury mma w tych obszarach.



Fot. 1. Zniszczenia nawierzchni asfaltowej przy krawędzi zewnętrznej: a) skutki powierzchniowego wychłodzenia na krawędzi w budowywanej mma, b) ubytki nawierzchni w wyniku przechłodzenia w całym przekroju warstwy



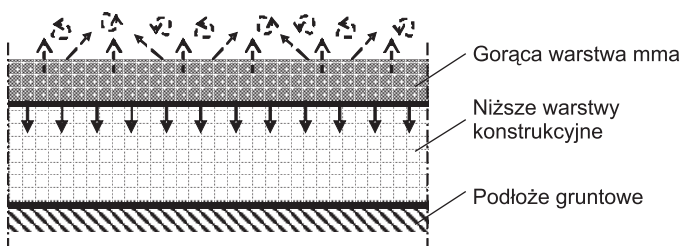
Fot. 2. Zniszczenia nawierzchni asfaltowej w obszarze krawędzi wewnętrznej: a) ubytki powierzchniowe, b) uszkodzenia wgłębne o nie-wielkiej szerokości

Przepływ ciepła w warstwie gorącej mma

Wbudowywaniu mieszanek mineralno-asfaltowych w technologii na gorąco towarzyszy proces wymiany ciepła. W samej warstwie mma dochodzi do jego przepływu w stanie nieustalonym. Oznacza to, że wartości temperatury w każdym punkcie warstwy różnią się od siebie. Równocześnie zmieniają się w czasie, przyjmując coraz niższe wartości, dążąc w ostateczności do wyrównania z otoczeniem. Dynamika zmian temperatury jest wynikiem zarówno przewodności cieplnej samej warstwy (definiowanej współczynnikiem przewodzenia ciepła λ) jak i zdolnością do odbioru ciepła przez czynniki będące w bezpośrednim kontakcie z gorącą mma. Pobór ciepła może odbywać się na zasadzie przewodzenia, promieniowania i konwekcji (zjawiska te mogą zachodzić oddzielnie bądź jednocześnie, np. promieniowanie łącznie z konwekcją).

Przez warstwę mma jest rozumiany układ ograniczony dwoma płaszczyznami równoległymi do siebie. Warstwę charakteryzuje stała grubość i wymiar ten jest znacznie mniejszy od dwóch pozostałych, tj. szerokości i długości. Właściwości fizyczne ciała (np. gęstość, gęstość objętościowa, przewodność cieplna, ciepło właściwe, zawartość wolnych przestrzeni itp.) w każdym punkcie warstwy w ujęciu makroskopowym są stałe i jednorodne. Jest to pewnego rodzaju uproszczenie. W warunkach rzeczywistych niektóre z wymienionych parametrów zmieniają się w trakcie zagęszczania, wzrastają (gęstość objętościowa, przewodność cieplna) bądź maleją (zawartość wolnych przestrzeni w mma). Przyjęcie wartości końcowych do obliczeń (po zagęszczaniu warstwy) jest przypadkiem najbardziej niekorzystnym dla omawianego zagadnienia. Oznacza to, że przepływ ciepła w gorącej mma jest największy, a przy dużych możliwościach jego odbioru przez środowisko i szybkość wychładzania dąży do maksimum.

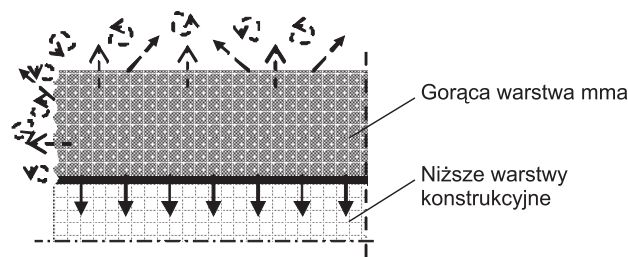
Zagadnienie przepływu ciepła w warstwie można odnieść również do przypadku o wymiarach skończonych (szerokości i długości), ale izolowanych powierzchniach bocznych. To powoduje, że wymiana ciepła w obu przypadkach odbywa się praktycznie przez powierzchnie poziome (rys. 1).



Rys. 1. Formy wymiany ciepła w procesie stygnięcia warstwy gorącej mma przy przepływie jednokierunkowym. Oznaczenia schematyczne: \downarrow – przewodzenie, \uparrow – promieniowanie, \uparrow – konwekcja swobodna, \uparrow – konwekcja wymuszona

Wymiana ciepła, przedstawiona na rysunku 1, w warunkach rzeczywistych (tj. na drodze) dotyczy obszarów w pewnej odległości od krawędzi warstwy. Nie uwzględnia się w niej dodatkowego efektu wychładzania przez powierzchnie boczne, co wielokrotnie odbiór ciepła przez środowisko. Docho-

dzi tam do jego wydatkowania zarówno przez płaszczyzny poziome, jak i powierzchnię boczną (rys. 2). Dodatkowo, chropowatość krawędzi intensyfikuje zawirowania powietrza, a tym samym zwiększa udział konwekcji wymuszonej w całkowitej wymianie ciepła z otoczeniem.



Rys. 2. Formy wymiany ciepła w procesie stygnięcia warstwy gorącej mma przy odbiorze ciepła przez powierzchnie poziome i pionową. Oznaczenia jak na rys. 1

Zjawisko przewodzenia ciepła w stanie nieustalonym opisuje równanie różniczkowe Fouriera [1]. Jego rozwiązanie opiera się o metodę rozdzielania zmiennych i poszukiwaniu iloczynu dwóch funkcji: czasu i przestrzeni. Ostatecznie, dla warunku stygnięcia warstwy (przy określonych warunkach brzegowych) uzyskuje się równanie (1) [6–8], pozwalające określić temperaturę w dowolnym jej miejscu w oparciu o liczbę podobieństwa Biota (Bi) i Fouriera (Fo).

$$T(x) = T_{os} + \left[\left(\sum_{n=1}^{n=\infty} e^{-\delta_n^2 Fo} \frac{2 \sin \delta_n}{\delta_n + \sin \delta_n \cos \delta_n} \cos \delta_n \frac{x}{s_m} \right) \cdot (T_p - T_{os}) \right] = T_{os} + Y \cdot (T_p - T_{os}) \quad (1)$$

$$Fo = \frac{\lambda \cdot \tau}{\rho_p \cdot c \cdot s_m^2} \quad (2)$$

$$Bi = \frac{\alpha \cdot s_m}{\lambda} \quad (3)$$

w którym:

T – temperatura w warstwie w chwili τ i w odległości x od płaszczyzny leżącej w osi warstwy, K;

T_p – temperatura początkowa warstwy w czasie $\tau = 0$, K;

T_{os} – temperatura ośrodka, w którym znajduje się ciało, K;

α – współczynnik wnikania ciepła do środowiska, $W/(m^2 \cdot K)$;

s_m – odległość prostopadła powierzchni ciała od płaszczyzny leżącej w osi ciała, m;

x – odległość rozpatrywanego punktu od płaszczyzny leżącej w osi warstwy, m;

λ – współczynnik przewodzenia ciepła warstwy mma, $W/(m \cdot K)$;

τ – czas od chwili rozpoczęcia ruchu ciepła, s;

ρ_p – gęstość objętościowa w warstwie mma, kg/m^3 ;

c – ciepło właściwe mma, $J/(kg \cdot K)$;

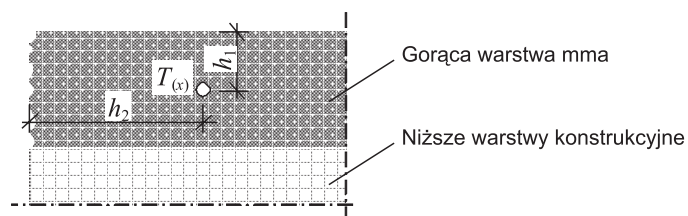
δ_n – punkty przecięcia funkcji $Y_1 = ctg \delta$ i funkcji $Y_2 = \delta/Bi$.

Równanie (1) może być stosowane do obliczania spadków temperatury w warstwie gorącej mma przy przepływie jedno-

kierunkowym ciepła, tj. przez powierzchnię poziomą górną i dolną. Dla obszarów przykrawędziowych warstwy, w których dochodzi do odbioru ciepła również przez powierzchnię pionową boczną, można skorzystać z zasady Newmana, zgodnie z którą kształt ciała daje się utworzyć z ciał nieskończonych lub półnieskończonych (przy zachowaniu warunku ich prostopadłości) [6]. Dla omawianego przypadku jest to jednak pewne uproszczenie, wynikające z różnych wartości współczynnika wnikania ciepła α na obu powierzchniach wymiany. Różnice nie są jednak na tyle duże, aby dyskwalifikować metodykę, a uzyskane wyniki obliczeń są zbliżone do wartości uzyskiwanych z pomiarów laboratoryjnych.

Do obliczenia temperatury teoretycznej w określonym punkcie warstwy w obszarze przykrawędziowym wykorzystuje się równanie (1), przy czym wartość Y jest iloczynem składowych Y_{h1} i Y_{h2} (4), zgodnie z rysunkiem 3.

$$Y = Y_{h1} \cdot Y_{h2} \quad (4)$$



Rys. 3. Schemat wyznaczania parametru Y przy wychładzaniu obszaru przykrawędziowego gorącej warstwy mma z uwzględnieniem metody Newmana

Stygnięcie gorącej warstwy mma w obszarze jej krawędzi jest wynikiem ochładzania przez powierzchnie poziome (Y_{h1}) i krawędź pionową (Y_{h2}). Odpowiada to procesowi stygnięcia ciała złożonego z dwóch ciał półnieskończonych. W przypadku pierwszego ciała parametr s_m odpowiada grubości wbudowywanej warstwy, natomiast w drugim jest to szerokość warstwy. Ze względu na znacznie większy wymiar w drugim przypadku, efekt wychładzania od krawędzi warstwy będzie zauważalny tylko w stosunkowo niedużej odległości od niej. Zwiększanie odległości h_2 ogranicza wpływ parametru Y_{h2} na wartość Y ($Y_{h2} \rightarrow 1$), a oziębianie się warstwy w tych miejscach odbywa się praktycznie przez powierzchnie poziome. Ma to swoje uzasadnienie fizyczne i odwzorowuje możliwości przepływu ciepła od środka warstwy do jej krawędzi zewnętrznej. W przypadku Y_{h2} odległość ta jest na tyle duża, że odbiór ciepła przez środowisko zewnętrzne w żaden sposób nie jest rekompensowany jego przyływem ze środka warstwy.

Omówiona metodyka pozwala wyznaczać spadki temperatury w ochładzanej warstwie mma, znajdującej się w jednorodnym ośrodku. Zdolność poboru ciepła przez środowisko jest jednak różna nie tylko na powierzchniach poziomych, ale i krawędzi bocznej. Zatem wyniki obliczeń temperatury teoretycznej będą obciążone pewnym błędem, ale stanowią dobry pogląd (potwierdzony wynikami pomiarów) na straty ciepła w oziębianej warstwie z gorącej mma.

Pobór ciepła przez środowisko

Zdolność środowiska do poboru ciepła z gorącej mma łącznie z przewodnością cieplną warstwy decydują o szybkości jej wychładzania. Ciepło płynie przez warstwę od jej środka i przez powierzchnie oddawane jest do czynników, będących z nią w kontakcie. Rozkład temperatury w warstwie zależy zatem od wartości jej współczynnika przewodzenia i wnikania do środowiska, a dokładnie od stosunku między nimi.

Wymiana ciepła pomiędzy gorącą warstwą mma a środowiskiem ją otaczającym odbywa się poprzez przewodzenie, konwekcję oraz promieniowanie.

Przewodzenie

Zjawisko przewodzenia zachodzi w kontakcie z ciałami stałymi, np. dolną warstwą konstrukcyjną, elementami maszyn zagęszczających itp. Jest związane z przekazywaniem energii pomiędzy cząsteczkami wewnątrz ośrodka lub z jednego ośrodka do drugiego przy ich bezpośrednim zetknięciu. Poszczególne cząsteczki układu nie mogą wykazywać większych zmian położenia [8]. Brak ciągłości połączenia między ośrodkami powoduje, że w miejscach tych wymiana ciepła może przebiegać na zasadach wnikania bądź przewodzenia (gaz, pozostający w stanie spoczynku, pełni funkcje izolatora).

Parametrem opisującym zdolność poboru ciepła przez ciało stałe jest zastępczy współczynnik wnikania ciepła α_z (5).

$$\alpha_z = \frac{\lambda_z}{h_z} \quad (5)$$

w którym:

λ_z – współczynnik przewodzenia ciepła materiału, W/(m·K);

h_z – grubość warstwy pobierającej ciepło, m.

Wartość współczynnika przewodzenia ciepła wyznacza się w badaniu laboratoryjnym, w określonych warunkach temperatury i wilgotności (najczęściej dla suchego materiału). Każda ilość wody w takim materiale będzie wpływała na zdolność do odbioru ciepła, przede wszystkim ze względu na jej duże ciepło właściwe, równe 4,182 kJ/(kg·K). Należy ten czynnik uwzględniać, szczególnie przy warstwach niezwiązanych (np. kruszywo o ciągłym uziarnieniu) lub związanych o dużej wolnej przestrzeni, mogących w okresach po opadach atmosferycznych, zawierać znaczące jej ilości. Wypełnienie porów wodą powoduje wzrost zarówno przewodności cieplnej jak i ciepła właściwego warstwy, a tym samym zwiększa wyraźnie jej zdolność do odbioru ciepła z wbudowywanej mma. Jest to szczególnie ważne dla warstewki przypowierzchniowej, będącej w bezpośrednim kontakcie z wbudowywaną mieszanką. W tym obszarze może dochodzić do bardzo negatywnego zjawiska (ze względu na szybkie oziębianie), a mianowicie do wrzenia i parowania. Procesy związane z wymianą ciepła i udziałem wody, podczas wbudowywania mma, zostały omówione w [1–5].

Wnikanie ciepła do płynu

Ciepło z gorącej mma jest przejmowane przez płyn (powietrze, woda) w procesie wnikania (konwekcji połączonej z przewodzeniem w cienkiej warstwie przypowierzchniowej – rys. 4)

i promieniowania. Skutkuje to obniżaniem się temperatury warstwy, a prędkość z jaką to zjawisko zachodzi zależy od wartości sumarycznego współczynnika wnikania ciepła, określonego z równania (6).

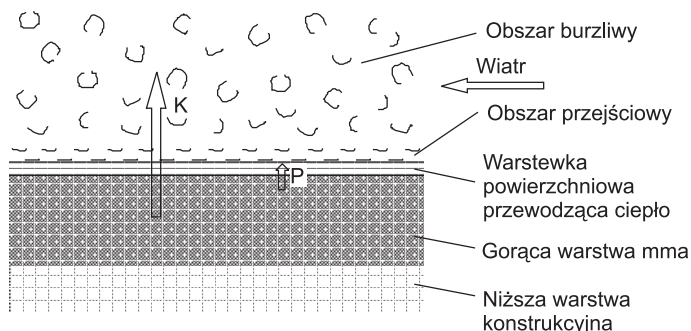
$$\alpha = \alpha_w + \alpha_s + \alpha_r \quad (6)$$

w którym:

α_w – współczynnik wnikania ciepła na skutek konwekcji wymuszonej, $W/(m^2 \cdot K)$;

α_s – współczynnik wnikania ciepła na skutek konwekcji swobodnej, $W/(m^2 \cdot K)$;

α_r – zastępczy współczynnik wnikania ciepła przez promieniowanie, $W/(m^2 \cdot K)$.



Rys. 4. Wymiana ciepła w procesie wnikania z uwzględnieniem poszczególnych stref: warstewki przewodzącej ciepło i obszarów konwekcji. Oznaczenia: K – wymiana ciepła przez konwekcję, P – wymiana ciepła przez przewodzenie

W procesie konwekcji wymianie podlegają całe warstwy czynnika o różnych wartościach temperatury, którego cząstki są w ruchu. W warunkach rzeczywistych dochodzi najczęściej do konwekcji mieszanej [9]. Jest to wynikiem nakładania się konwekcji wymuszonej α_w (prędkość masowa przepływu jest jednoznacznie określona, np. wiatr) oraz konwekcji naturalnej α_s (swobodnej), wynikającej z działania siły wyporu, będącej następstwem różnicy gęstości, spowodowanej różnicą temperatury w różnych miejscach płynu. W obu przypadkach drogi poszczególnych cząstek płynu mogą układać się równolegle (ruch uwarstwiony) lub powstawać zawirowania (ruch burzliwy).

Współczynniki wnikania ciepła na skutek konwekcji wymuszonej i swobodnej określa się ze wzoru (7), w oparciu o liczbę Nusselta Nu [6–8].

$$\alpha_{w,s} = \frac{Nu \cdot \lambda_p}{d} \quad (7)$$

w którym:

d – wymiar charakterystyczny, np. szerokość warstwy lub jej grubość (odpowiednio przy oznaczaniu poboru ciepła z powierzchni warstwy bądź przez jej krawędź pionową), m;

λ_p – współczynnik przewodzenia ciepła w płynie, $W/(m \cdot K)$.

Liczba Nusselta zależy od charakteru przepływu płynu w warstwie przyściennej (laminarny lub burzliwy). Charakter przepływu określa się na podstawie bezwymiarowych liczb charakterystycznych Reynoldsa (Re), Prandtla (Pr) oraz Grashoffa (Gr), wyrażonych wzorami (8), (9) i (10) [6], [8], [9].

$$Re = \frac{w \gamma_p d}{\eta} \quad (8)$$

$$Pr = \frac{c_p \eta}{\lambda_p} \quad (9)$$

$$Gr = \frac{g \beta \Delta T d^3 \gamma_p^2}{\eta^2} \quad (10)$$

w których:

η – dynamiczny współczynnik lepkości płynu, $N \cdot s/m^2$;

w – prędkość przepływu płynu w strumieniu niezaburzonym, m/s;

γ_p – gęstość płynu, kg/m^3 ;

c_p – ciepło właściwe płynu przy stałym ciśnieniu, $J/(kg \cdot K)$;

g – przyspieszenie siły ciężkości, $9,81 m/s^2$;

β – współczynnik rozszerzalności objętościowej płynu, $1/K$;

ΔT – różnica, pomiędzy temperaturą warstwy (mma) a temperaturą płynu, otoczenia (np. powietrza) $\Delta T = T_s - T_{os}$, K.

W przypadku konwekcji wymuszonej ruch płynu bezpośrednio nad powierzchnią płaską odbywa się w sposób laminarny w zakresie wartości liczby $Re < 8 \cdot 10^4 - 5 \cdot 10^5$, natomiast przy wielkości $5 \cdot 10^5 - 10^7$ charakter przepływu jest burzliwy. Liczbę Nusselta dla powierzchni poziomych i pionowych określa się odpowiednio ze wzorów (11) (przepływ laminarny) i (12) (przepływ burzliwy) [7–9].

$$Nu = 0,664 Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}} \quad (11)$$

$$Nu = 0,0366 Re^{\frac{4}{5}} Pr^{\frac{1}{3}} \quad (12)$$

Charakter ruchu przy konwekcji swobodnej („unoszenia” ciepła) określa się na podstawie krytycznej wartości iloczynu liczb Gr i Pr , nazywanych liczbą Reyleigha (Ra). Przy przepływie laminarnym wartość Ra dla powierzchni płaskiej pionowej powinna mieścić się w zakresie od $5 \cdot 10^2$ do $2 \cdot 10^7$, a przy powierzchni poziomej od 10^5 do $2 \cdot 10^7$. Średnią wartość liczby Nu dla obu przypadków, zgodnie z Michiejewem [8], oblicza się ze wzoru (13).

$$Nu = 0,54 (Gr Pr)^{\frac{1}{4}} \quad (13)$$

Liczba Ra przy przepływie burzliwym płynu w warstwie przyściennej powierzchni pionowej i poziomej powinna mieścić się w zakresie od $2 \cdot 10^7$ do 10^{13} . Wielkość wymiany ciepła (Nu) określa się ze wzoru (14) [6].

$$Nu = A (Gr Pr)^{\frac{1}{3}} \quad (14)$$

w którym:

A – stała, której wartość przy powierzchni pionowej wynosi 0,135, a przy powierzchni poziomej 0,14.

Straty ciepła na skutek promieniowania wynikają z różnicy pomiędzy energią zaabsorbowaną z promieniowania słonecznego i wypromieniowaną z gorącej mma. Opisuje to zastępczy współczynnik wnikania ciepła przez promieniowanie (15) [6], [7].

$$\alpha_r = \frac{q}{\Delta T} = \frac{\varepsilon_1 I_s - \varepsilon_1 C_0 \left[\left(\frac{T_{mma}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right]}{T_{mma} - T_{pow}} \quad (15)$$

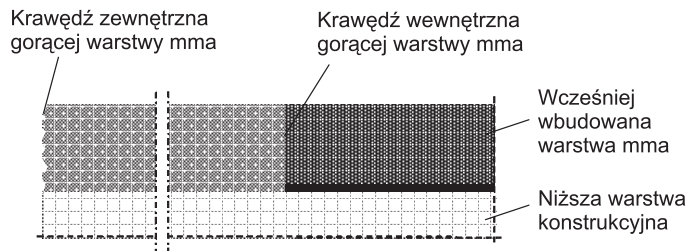
w którym:

- I_s – gęstość strumienia promieniowania słonecznego, W/m²;
- ε_1 – zdolność emisji mieszanki mineralno-asfaltowej;
- C_0 – stała promieniowania ciała doskonale czarnego, $C_0 = 5,768 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$;
- T_{mma} – temperatura powierzchni warstwy mma, K;
- T_1 – temperatura otwartej przestrzeni, $T_1 = 230 \text{ K}$ [6], [11];
- T_{pow} – temperatura powietrza, K.

Temperatura teoretyczna i pomierzona przy krawędziach oziębianej warstwy mma

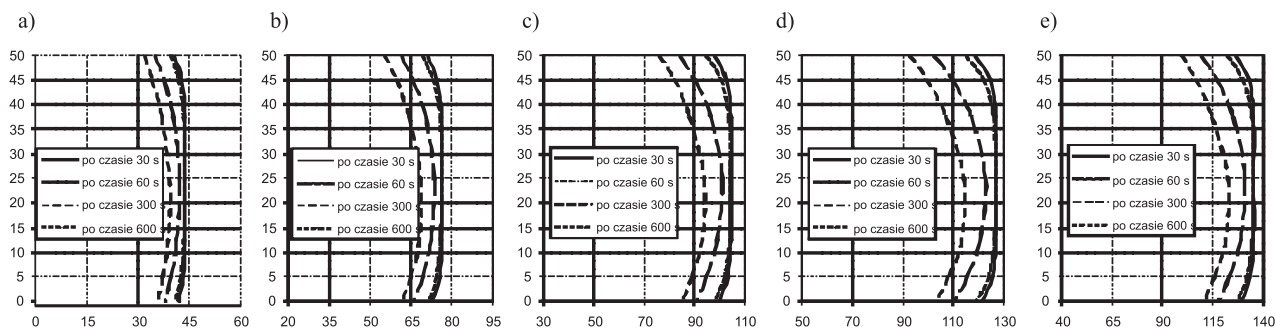
Miejscami skumulowanego poboru ciepła są obszary przykrawędziowe warstw gorącej mma. Ciepło jest tam wydatkowane przez powierzchnie poziome (górną i dolną) oraz krawędź pionową. Chropowata tekstura powierzchni bocznej warstwy dodatkowo intensyfikuje zawirowania powietrza, a tym samym powiększa straty ciepła na skutek konwekcji wymuszonej. W konsekwencji okazuje się, że miejsca te, nawet w przypadku grubych warstw (powyżej 8–10 cm), powinny być stosunkowo szybko zagęszczane.

Prędkość wychładzania się mma jest zróżnicowana w obszarze krawędzi „zewnątrznej” i „wewnętrznej”. Przez krawędź zewnętrzną jest rozumiana boczna krawędź rozkładania

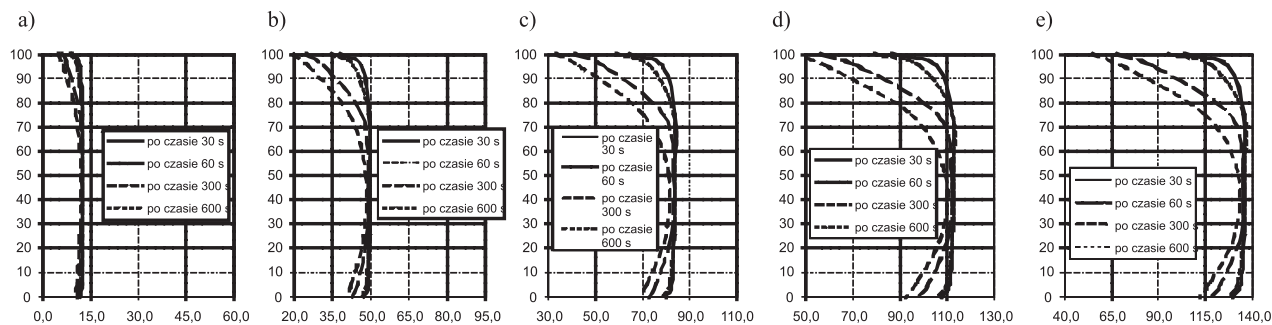


Rys. 5. Krawędź zewnętrzna i wewnętrzna wbudowywanej gorącej warstwy mma (schemat przyjęty do obliczeń)

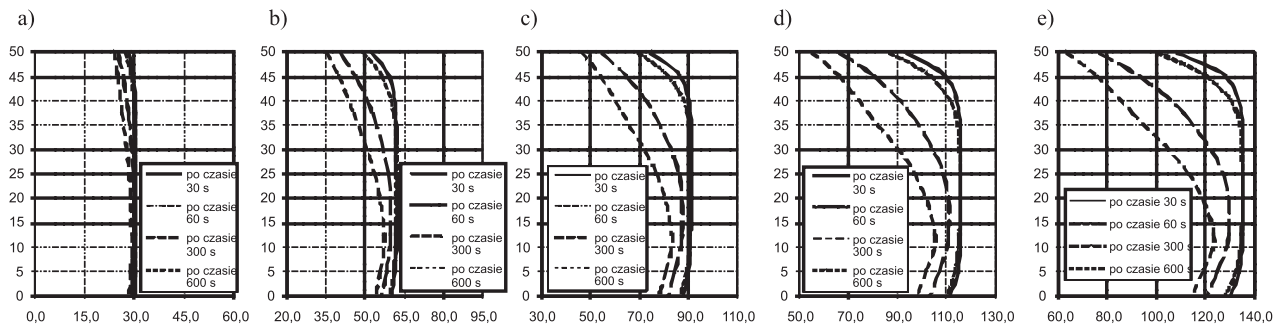
nej mma, narażonej na bezpośrednie oddziaływanie warunków atmosferycznych (rys. 5). Krawędź wewnętrzna jest traktowana jako miejsce kontaktu z mma, wbudowaną wcześniej (rozkładanie połową szerokości jezdni). Dla tych dwóch przypadków określono rozkład temperatury teoretycznej w warstwie o szerokości 3,5 m i grubości 5 cm oraz 10 cm. Wyniki uzyskano dla dwóch wartości temperatury powietrza 0°C i +20°C, przy wietrze o prędkości 0 i 10 m/s, stałej wilgotności względnej powietrza $\varphi = 80\%$ oraz temperatury wyjściowej mma równej 135°C. Właściwości fizyczne mma kształtowały się następująco: współczynnik przewodzenia ciepła $\lambda_{mma} = 1,300 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, ciepło właściwe $c_{mma} = 0,921 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, gęstość strukturalna $\gamma_{mma} = 2,690 \text{ Mg}/\text{m}^3$. Identyczne parametry przyjęto dla warstwy nawierzchni niżej leżącej o grubości 10 cm i temperaturze równej temperaturze powietrza. Spadki temperatury na krawędzi zewnętrznej warstwy oraz w odległości 5, 10 i 15 cm od niej przedstawiono na rysunkach 6–9, natomiast dla krawędzi wewnętrznej na rysunkach 10–11. Celem porównania przedstawiono rów-



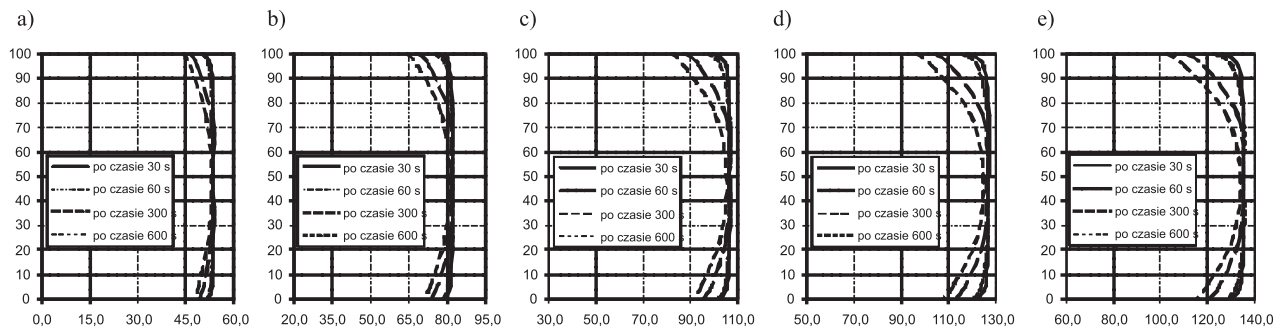
Rys. 6. Temperatura teoretyczna w obszarze zewnętrznej krawędzi warstwy mma o grubości 5 cm w temperaturze powietrza 0°C i przy wietrze o prędkości 0 m/s w zależności od czasu: a) na powierzchni krawędzi warstwy, b) w odległości 5 cm od krawędzi, c) w odległości 10 cm od krawędzi, d) w odległości 15 cm od krawędzi, e) w środku rozpatrywanej warstwy



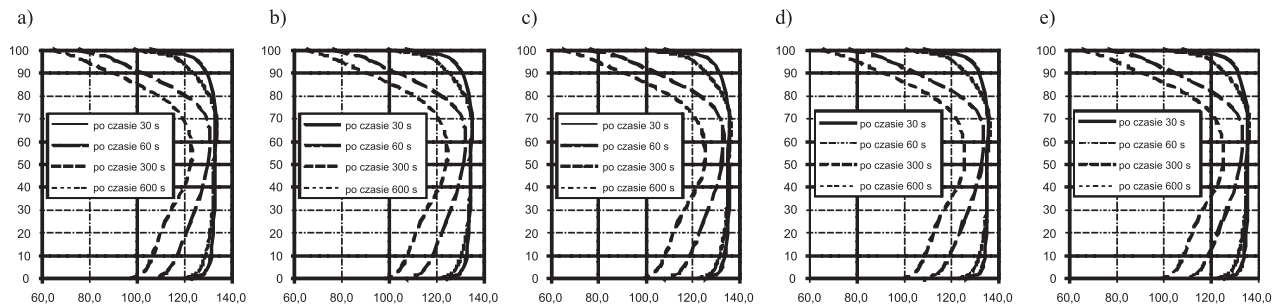
Rys. 7. Temperatura teoretyczna w obszarze zewnętrznej krawędzi warstwy mma o grubości 10 cm w temperaturze powietrza 0°C i przy wietrze o prędkości 10 m/s w zależności od czasu: a) – e) j.w.



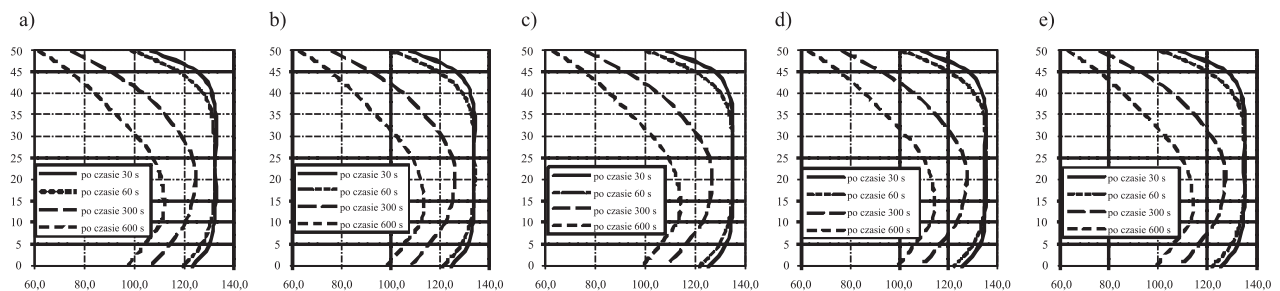
Rys. 8. Temperatura teoretyczna w obszarze zewnętrznej krawędzi warstwy mma o grubości 5 cm w temperaturze powietrza 20°C i przy wietrze o prędkości 10 m/s w zależności od czasu: a) – e) j.w.



Rys. 9. Temperatura teoretyczna w obszarze zewnętrznej krawędzi warstwy mma o grubości 10 cm w temperaturze powietrza 20°C i przy wietrze o prędkości 0 m/s w zależności od czasu: a) – e) j.w.



Rys. 10. Temperatura teoretyczna w obszarze wewnętrznej krawędzi warstwy mma o grubości 10 cm w temperaturze powietrza 20°C i przy wietrze o prędkości 10 m/s w zależności od czasu: a) – e) j.w.



Rys. 11. Temperatura teoretyczna w obszarze wewnętrznej krawędzi warstwy mma o grubości 10 cm w temperaturze powietrza 20°C i przy wietrze o prędkości 10 m/s w zależności od czasu: a) – e) j.w.

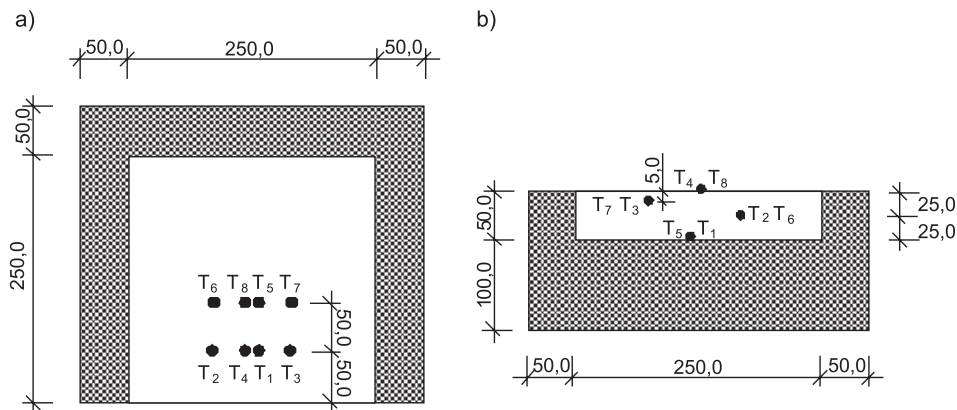
niez rozkład temperatury w środku warstwy mma. Wysokość warstwy liczona jest od jej spodniej powierzchni, tj. od miejsca kontaktu z niższą warstwą konstrukcyjną.

W obliczeniach nie uwzględniono oddziaływania wody i elementów stalowych bębnow walców. Zdolność do poboru ciepła tych czynników (wyrażona dużymi wartościami współczynników wnikania) wpłynęłyby na jeszcze większe spadki temperatury w miejscach ich kontaktu z powierzchnią gorącej mma, a tym samym i obszarów przykrawędziowych.

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że niezależnie od warunków atmosferycznych i grubości warstwy obszary w pobliżu krawędzi zewnętrznych powinny być zagęszczane bezpośrednio po rozłożeniu mma. Same powierzchnie boczne (zewnętrzne) stygną prawie natychmiast, praktycznie w każdych warunkach atmosferycznych. Podobną wrażliwością na ochłodzenie charakteryzują się miejsca w odległości do 5–7 cm od tych krawędzi. Tam, nawet przy sprzyjających warunkach atmosferycznych (20°C, bez wiatru) i grubej warstwie (10 cm), temperatura już po 30 s obniża się do granicznej, w której możliwe jest jeszcze prawidłowe przeprowadzenie procesu zagęszczania (rys. 9). Mniej sprzyjające warunki atmosferyczne (przede wszystkim wiatr i woda) przesuwają obszar niebezpieczny do 10 cm od krawędzi zewnętrznej, nawet w przypadku grubych warstw (rys. 7). W skrajnych przypadkach, tj. przy złych warunkach atmosferycznych i niedużych grubościach, szerokość wychładzanej warstwy może sięgać nawet 15 cm (rys. 8). Większa odległość ogranicza oddziaływanie krawędzi bocznej na straty ciepła w wychładzanej warstwie.

Na charakter zmian temperatury w przekroju warstwy w obszarze zewnętrznym wyraźny wpływ ma oddziaływanie krawędzi bocznej, szczególnie w krótkim okresie czasu (do 2 min.) i w odległości do 5–7 cm. W dłuższym okresie (po ok. 5 min.) zaznacza się przewaga powierzchni poziomych (górnej i dolnej), jako czynników odbierających ciepło. Jest to wynikiem w pewnym stopniu zahamowania (zmniejszenia) poboru ciepła przez krawędź zewnętrzną (wartości temperatury w tym obszarze warstwy są zbliżone do temperatury otoczenia), a tym samym przesunięcia siły tego zjawiska w kierunku powierzchni poziomych. W odległości ok. 10 cm od krawędzi bocznej wbudowywanej warstwy charakter zmian temperatury upodabnia się do obserwowanej w środku warstwy, a przy 15 cm jest już prawie identyczny. Można zatem przyjąć, że ta odległość (15 cm) jest graniczną, w której zauważalny jest wpływ oddziaływań czynników zewnętrznych przez krawędź boczna.

Od strony teoretycznej całkowicie odmiennie wygląda sytuacja w obszarze krawędzi wewnętrznej. Tam praktycznie nie obserwuje się jakichś znaczących różnic w stratach ciepła w stosunku do środka warstwy. Zachowany jest zarówno charakter zmian temperatury, jak i szybkość przebiegu tego zjawiska. Decydują o tym przyjęte warunki brzegowe do obli-



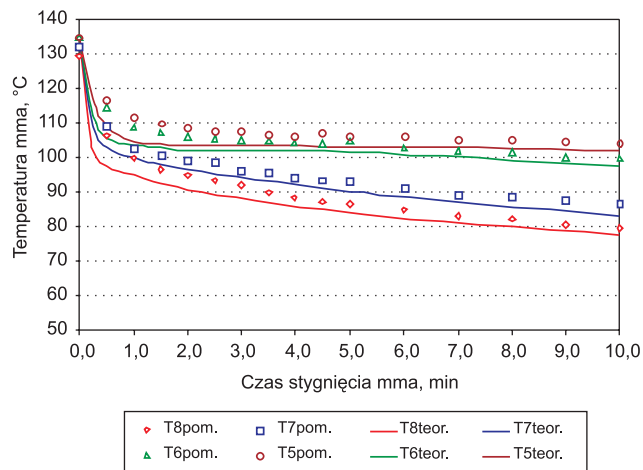
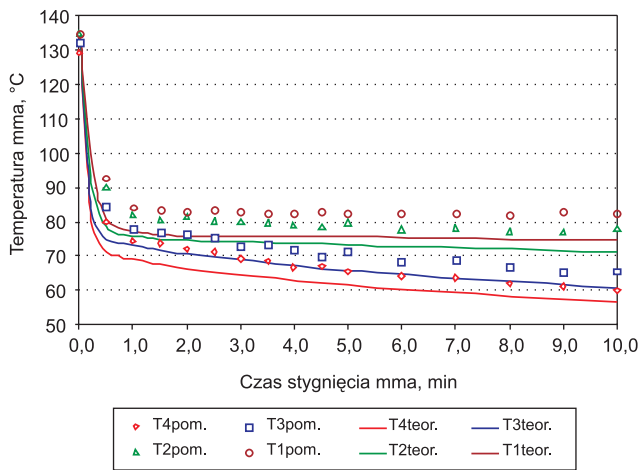
Rys. 12. Schemat rozmieszczenia termopar do pomiaru temperatury w ochładzanej próbce mma, a) widok z góry próbki, b) przekrój poprzeczny próbki

czeń. Do podstawowych, mających wpływ na uzyskane wyniki, należą równa wysokość obu warstw oraz przepływ ciepła wyłącznie do wcześniej wbudowanej mma. Parametry fizyczno-ciepłne mieszanki predestynują ją bardziej do grupy izolatorów niż odbiorników ciepła (przede wszystkim ze względu na stosunkowo małą wartość współczynnika przewodzenia ciepła), co spowalnia odbiór ciepła z gorącej mma.

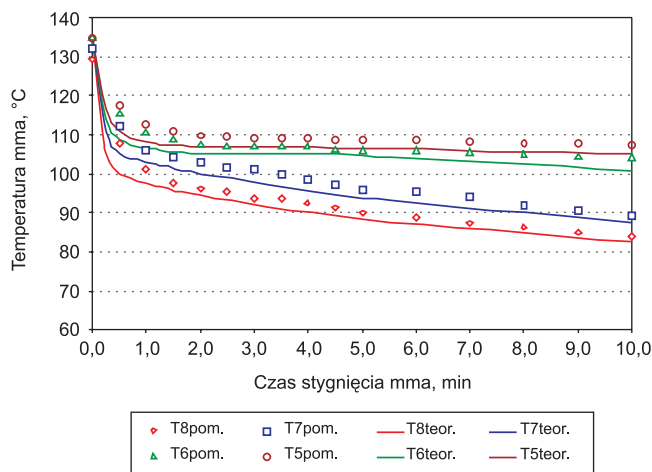
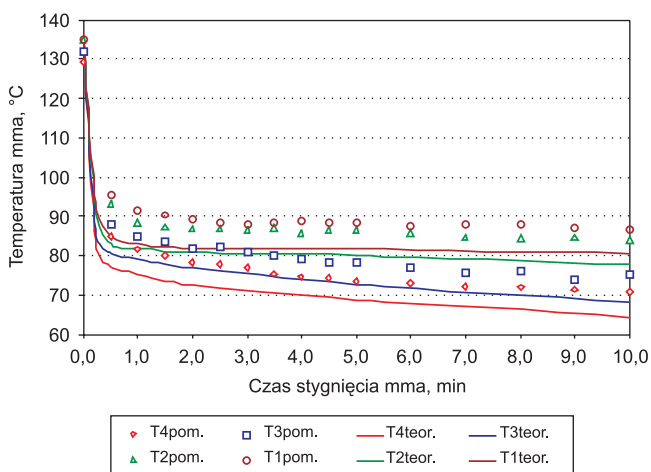
Aby potwierdzić poprawność uzyskanych wyników teoretycznych (szczególnie dla przypadku krawędzi zewnętrznej) przeprowadzono badania w skali laboratoryjnej na próbkach mma o wymiarach 250 mm × 250 mm i grubości ok. 50 mm. Parametry fizyczne jednej z próbek odpowiadały wartościom przyjętym do obliczeń teoretycznych. Badania polegały na określeniu spadków temperatury w próbkach mma ogrzanych do 135°C i poddanych oddziaływaniu powietrza o prędkości przepływu 0 i 10 m/s w temperaturze 0 i 20°C. Wartości temperatury mierzono w odległości 5 i 10 cm od nieizolowanej krawędzi bocznej próbki (rys. 12).

Odczyty temperatury prowadzono na powierzchni próbek za pomocą pirometru, natomiast w środku warstwy, w odległości 5 mm od płaszczyzny poziomej górnej oraz na spodzie warstwy za pomocą termometrów termoelektrycznych (wtopione termopary). Aby zminimalizować straty ciepła poprzez pozostałe trzy krawędzie boczne i płaszczyznę dolną, próbki zostały zabezpieczone folią aluminiową, zaizolowane warstwą wełny mineralnej twardej (grubości 5 cm – krawędzie boczne, grubości 10 cm – płaszczyzna dolna) o współczynnika przewodzenia $\lambda=0,037$ W/(m·K) oraz folią hydroizolacyjną (żaroodporną) pełniącą funkcję zabezpieczenia przed ewentualnym wnikaniem wilgoci. Tak przygotowany element badawczy pozwolił określić straty ciepła jak dla przepływu jednokierunkowego z uwzględnieniem strat przez powierzchnie boczna, tj. w wyniku jego poboru przez powierzchnię poziomą górną i jedną z nieizolowanych krawędzi. Dla tak przyjętych założeń próbka laboratoryjna o grubości 5 cm w warunkach rzeczywistych odpowiada warstwie grubości 10 cm.

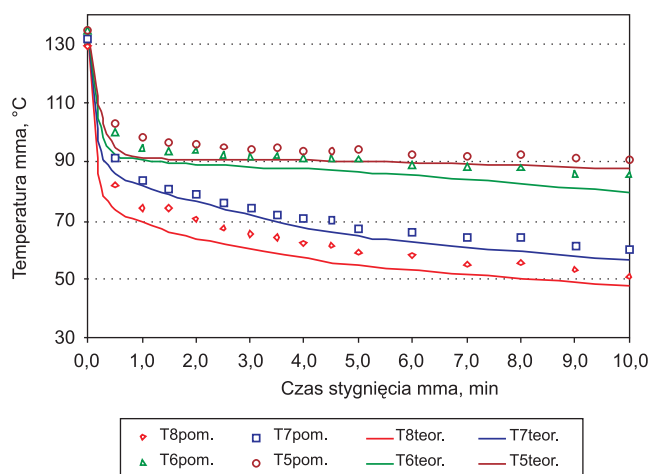
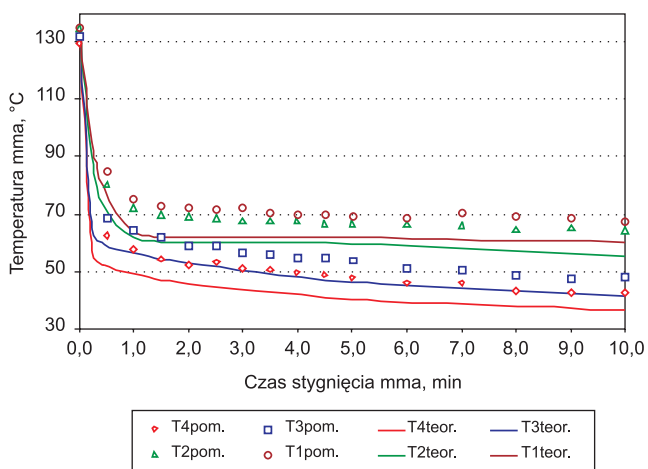
Wyniki pomiarów zmian temperatury w przekroju gorącej warstwy mma dla określonych prędkości wiatru i wartości temperatury powietrza przedstawiono na rysunkach 13–15. Widać z nich, że zaproponowany model teoretyczny pozwala zachować charakter strat ciepła oziębianej próbki mma.



Rys. 13. Temperatura w warstwie mma o grubości 5 cm w odległości 5 cm (a) i 10 cm (b) od niez izolowanej krawędzi przy temperaturze powietrza 0°C oraz wietrze o prędkości 0 m/s. Oznaczenia: T1pom. ÷ T8pom. – temperatura pomierzona w przekroju warstwy, zgodnie z rys. 14, T1teor. ÷ T8teor. – temperatura teoretyczna w przekroju warstwy, zgodnie z rys. 14



Rys. 14. Temperatura w warstwie mma o grubości 5 cm w odległości 5 cm (a) i 10 cm (b) od niez izolowanej krawędzi przy temperaturze powietrza 20°C oraz wietrze o prędkości 0 m/s. Oznaczenia j.w.



Rys. 15. Temperatura w warstwie mma o grubości 5 cm w odległości 5 cm (a) i 10 cm (b) od niez izolowanej krawędzi przy temperaturze powietrza 20°C oraz wietrze o prędkości 10 m/s. Oznaczenia j.w.

Szczególnie dobre odwzorowanie osiągnięto przy pomiarach w odległości 10 cm od niez izolowanej krawędzi. W tej odległości (dla przyjętych warunków oddziaływań zewnętrznych) zanika wpływ krawędzi, a decydujące znaczenie zaczyna odgrywać wnikanie ciepła do otoczenia przez powierzchnię poziomą górną. W odległości 5 cm od krawędzi są wyraźniejsze rozbieżności pomiędzy temperaturą pomierzoną i teoretyczną, a średnia wartość różnicy pomiędzy uzyskanymi wynikami wynosi ok. 7,5°C. Przy odległości 10 cm różnica ta wynosi już tylko 4°C.

Zmiany temperatury w próbce mma w odległości 5 cm są wynikiem wnikania ciepła do środowiska zarówno przez krawędź pionową jak poziomą. Większe niedopasowanie uzyskanych wyników z pomiarów do modelu jest efektem wprowadzonych uproszczeń, a mianowicie: zróżnicowaniami w wartościach współczynników wnikania ciepła na obu powierzchniach oraz stopieniem turbulencji, przede wszystkim przy wymuszonym przepływie powietrza (kierunkiem przepływu powietrza oraz uśrednieniem liczby Re).

Podsumowanie i wnioski

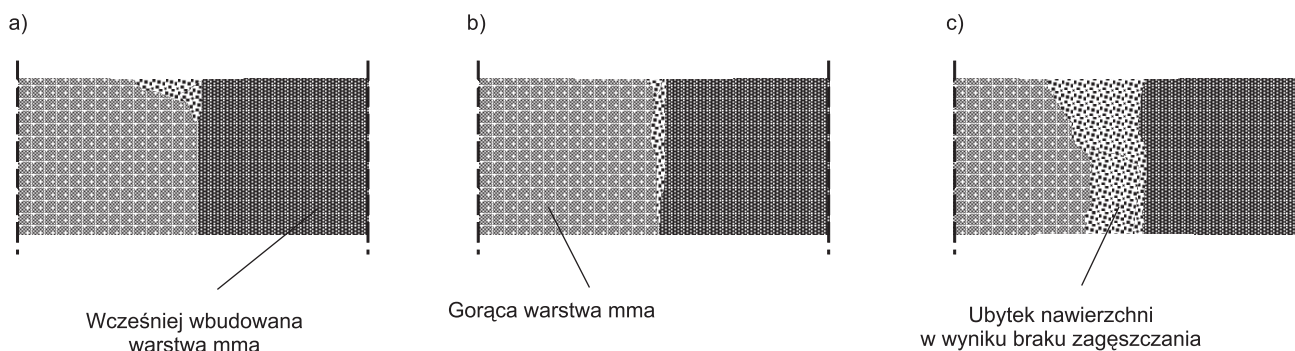
Jednym z częstych uszkodzeń wierzchnich warstw nawierzchni asfaltowych są ubytki w obszarze ich krawędzi zewnętrznych lub szwa wewnętrznych. Może być to spowodowane złymi warunkami atmosferycznymi lub stanem podłoża podczas prowadzenia robót, zbyt późnym najazdem walców lub brakiem oporu przy krawędzi jezdni na drogach zamiejskich (rozsuwanie się mma pod działaniem walca). Zawyżona wolna przestrzeń w mma w połączeniu z oddziaływaniem ruchu oraz warunkami atmosferycznymi doprowadzają do naruszenia struktury mieszanki i postępującej destrukcji warstwy.

Częstym przypadkiem braku zagęszczenia w obszarze krawędzi zewnętrznych jest zbyt wyiębienie mma. Wysoka lepkość lepiszcza (mastyksu) uniemożliwia odpowiednie przeprowadzenie tego procesu, co skutkuje niską gęstością objętościową mieszanki, a tym samym zaniżoną wytrzymałością. Znalazło to swoje potwierdzenie w przeprowadzonych obliczeniach z wykorzystaniem zaproponowanego modelu oraz badaniach laboratoryjnych. Oczywiście, sytuację tą mogą pogłębić niesprzyjające warunki atmosferycz-

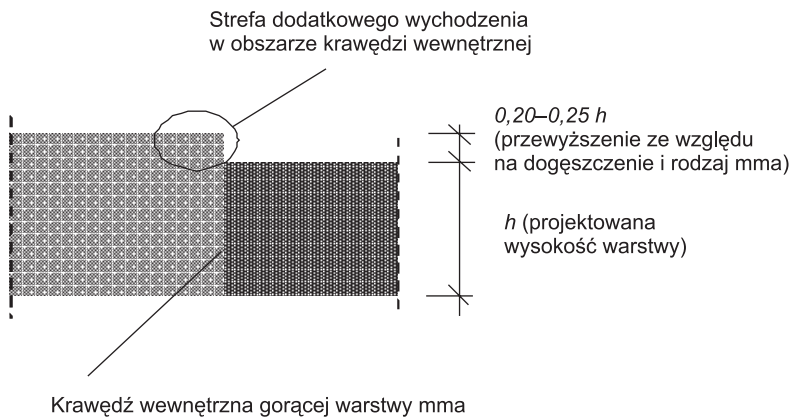
ne, przyspieszające wyiębienie się mma. W skrajnych przypadkach mogą one doprowadzić do braku spójności wbudowywanej mieszanki, skutkiem czego może dochodzić do odłamań, wykruszeń całych fragmentów nawierzchni (fot. 1b). W takich przypadkach trudno mówić o jakichś środkach zaradczych, poprawiających parametry mma. Jedynym rozwiązaniem, doprowadzającym nawierzchnie w tym obszarze do stanu używalności, byłoby przeprowadzenie remixingu na miejscu (z ewentualnym „odświeżeniem” lepiszcza) z prawidłowym zagęszczeniem mma. Skutki gorszego zagęszczenia w stosunku do wymaganego (rzędu 95%) można byłoby minimalizować w postaci dokładnego zabezpieczenia krawędzi warstwy (powierzchni pionowej i poziomej) przed wnikaniem wody. Pożądanym materiałem w tym przypadku mógłby być rozproszony (w wysokiej temperaturze) w cienkiej warstewce miękkiego asfaltu (np. 100/150) lub asfaltu upłynnionego. Wprowadzenie emulsji mogłoby doprowadzić do niekorzystnego zjawiska kumulowania wody (z rozpadu emulsji) w porach mieszanki mineralno-asfaltowej, szczególnie gdyby prace te prowadzone byłyby w okresie późnej jesieni.

Analizując straty ciepła w obszarze krawędzi wewnętrznych można byłoby dojść do wniosku, że uzyskanie odpowiedniego poziomu zagęszczenia tych miejsc nie powinno nastęczać trudności. Realia są jednak inne. Miejsca połączeń w obrębie szwa podłużnego bardzo często podlegają uszkodzeniom, otwarciom. Można w tym przypadku wyróżnić trzy formy zniszczeń (rys. 16).

Pierwsze (rys. 16.a) jest skutkiem wyiębienia wierzchniej warstewki wbudowywanej mma. W obliczeniach strat ciepła dla krawędzi wewnętrznej przyjęto założenie, że warstwy mają jednakową wysokość. Oznacza to, że przepływ ciepła w tym obszarze odbywał się praktycznie z jednej mieszanki do drugiej. Ze względu na współczynnik przewodzenia ciepła zjawisko to nie było zbyt intensywne. Inaczej sytuacja wygląda w warunkach rzeczywistych. Wysokość warstwy wbudowywanej mieszanki jest wyższa w stosunku do istniejącej o ok. 20–25%. Oznacza to dla warstwy o wysokości 4–5 cm, że około 1,0–1,2 cm części przypowierzchniowej jest narażone na znacznie bardziej intensywny pobór ciepła (współczynnik wnikania podobny jak przy krawędziach zewnętrznych przy cieńszej warstwie) (rys. 17). W konsekwencji warstewka grubości ok. 1,0 cm może w bardzo krótkim czasie ulec wychł-



Rys. 16. Zniszczenia powstające w obszarze szwu wewnętrznego nawierzchni asfaltowej na skutek braku zagęszczenia (jako następstwo zbyt szybkiego wyiębienia wbudowywanej mma): a) uszkodzenie powierzchniowe, b) uszkodzenie wgłębne o małej szerokości, c) uszkodzenie wgłębne o dużej szerokości



Rys. 17. Rzeczywiste połączenie warstwy gorącej i zimnej mma z uwzględnieniem dodatkowego wychładzania w obszarze przewyższenia w wyniku udziału konwekcji w wymianie ciepła

dzeniu, czego efektem może być zawyżona wolna przestrzeń. Skutek – pojawiające się stosunkowo szybko uszkodzenia powierzchniowe na głębokość ok. 1 cm i szerokość ok. 5,0–15 cm (w zależności od warunków atmosferycznych). Najprostszą formą zabezpieczenia (nie dającą jednak pełnej gwarancji) jest przesmarowanie „otwartej” mma gorącym asfaltem lub asfaltem upłynnionym w cienkiej warstwie z posypaniem piaskiem lub mieszanką drobną granulowaną (zapobieganie przyklejaniu się do kół pojazdów). Czynność tą należy wykonać bezpośrednio po stwierdzeniu zwiększonej porowatości masy (jeszcze przed wystąpieniem pierwszych ubytków nawierzchni).

Drugi z przypadków (rys. 16.b) jest najczęściej wynikiem zawilgocenia krawędzi bocznej warstwy. Nawet niewielkie ilości zawartej tam wody prowadzą do natychmiastowego wyziębienia gorącej mma, a tym samym uniemożliwiają połączenie warstw. Następstwem tego jest gromadzenie się w dalszym okresie eksploatacji wody w obszarze szwa oraz dostęp powietrza i promieni słonecznych. Konsekwencją – uszkodzenia wywołane działaniem np. mrozu czy starzeniem, w wyniku kontaktu lepiszcza z tlenem z powietrza i promieniowania UV. Przypadek ten na etapie wykonawstwa można eliminować poprzez zastosowanie promienników podczerwieni (przytwierdzonych do rozkładarki), pozwalających na odparowanie wody z warstewki przypowierzchniowej już wbudowanej mma. Należy również eliminować nieprawidłowe zachowania się wykonawców, związane m.in. ze smarowaniem emulsją asfaltową krawędzi istniejącej warstwy bezpośrednio przed wbudowywaniem kolejnej (wprowadza się wodę w obszar krawędzi warstwy). Formą naprawy w tym przypadku jest nacięcie szwa piłą na pełną grubość warstwy i szerokość ok. 1–2 cm, dokładne oczyszczenie krawędzi i wypełnienie powstałej pustki zalewą asfaltową (z dopełnieniem), a następnie zasypianie piaskiem lub mieszanką drobną granulowaną.

Ostatnie z uszkodzeń (rys. 16.c) jest wynikiem nałożenia się wielu czynników, negatywnie oddziałujących na proces wbudowywania mma. Można tu wyróżnić niesprzyjające warunki atmosferyczne (silny wiatr, niska temperatura, duża wilgotność powietrza), zawilgocone podłoże i krawędź boczna istniejącej warstwy oraz nieodpowiednio prowadzony proces zagęszczania (zbyt późny najazd walców). Wyziębienie w tym

obszarze mma uniemożliwia osiągnięcie odpowiednich parametrów fizyczno-wytrzymałościowych, co przekłada się na jej podatność do zniszczeń. W wielu przypadkach dochodzi jeszcze czas oddania nawierzchni do eksploatacji, który przypada często na okres zimowy (procesy zamarzania, odmarzania, zasolenie itp.). Naprawę takich uszkodzeń można przeprowadzić w technologii miejscowego remixingu (szerokości 15–25 cm) z uzupełnieniem mieszanką. W przypadku braku takich możliwości (wąskie pasy ruchu bez utwardzonego pobocza, ruch o dużym natężeniu ze znaczną ilością pojazdów ciężarowych i niemożliwością zamknięcia remontowanego odcinka) powstałe uszkodzenia można wypełniać mieszanką gryso-emulsyjną, wykorzystując tzw. „patchery”. Osłabione krawędzie należy usunąć, a następnie całość dokładnie oczyścić. Do wypełnienia należy wyko-

rzystywać wysokiej jakości grysy (kl. I) w połączeniu z emulsją modyfikowaną (najlepiej na bazie lepiszcza 50/70 lub 70/100). Po wykonaniu tych czynności wypełnienie należy przesmarować gorącym asfaltem lub asfaltem upłynnionym (w cienkiej warstwie) i zasypać piaskiem lub mieszanką drobną granulowaną. Ma to na celu zamknięcie powierzchniowe naprawianego fragmentu nawierzchni i jej zabezpieczenie przed wnikiem wody.

Podsumowując, przedstawiona powyżej analiza przepływu ciepła w obszarach przykrawędziowych, poparta badaniami w skali laboratoryjnej, powinna uświadomić wykonawców na temat istniejących tam zagrożeń. Prawie natychmiastowe wprowadzanie maszyn zagęszczających na wrażliwe fragmenty nawierzchni umożliwia prawidłowe przeprowadzenie procesu wbudowania mma przy założeniu, że warunki atmosferyczne i stan podłoża podczas prowadzenia robót są odpowiednie. Pozwoli to w konsekwencji uniknąć bardzo często widocznych na naszych drogach ubytków nawierzchni w miejscach szwów podłużnych i krawędzi bocznych warstw z mma.

Bibliografia

- [1] Mieczkowski P.: *The heat balance In the process of compacting of hot asphalt mineral mixtures using steel rollers*. Archives of civil engineering, LII, 1, 2006, s. 151-175
- [2] Mieczkowski P.: *Wymiana ciepła w procesie zagęszczania mieszanki mineralno-asfaltowych walcami stalowymi*. Drogownictwo nr 3/2003, s. 82-85
- [3] Mieczkowski P.: *Zagęszczanie mieszank mineralno-asfaltowych w grubych warstwach – korzyści i problemy*. Drogownictwo, nr 1/2007
- [4] Mieczkowski P.: *Zagęszczanie mma w cienkich warstwach. Uwagowania cieplne*. Magazyn Autostrady, 2006, nr 10, s. 94-104
- [5] Stefańczyk B., Mieczkowski P.: *Mieszanki mineralno-asfaltowe. Wykonawstwo i badania*. WKiŁ, Warszawa 2008
- [6] Hobler T.: *Inżynieria chemiczna. Ruch ciepła i wymienniki*. WNT, Warszawa 1971
- [7] Wiśniewski S.: *Wymiana ciepła*. PWN, Warszawa 1988
- [8] Staniszewski S.: *Wymiana ciepła. Podstawy teoretyczne*. PWN, Warszawa 1979
- [9] Petela R.: *Przepływ ciepła*. PWN, Warszawa 1983
- [10] Daniels K.: *Sonnenenergie in Theorie und Praxis*. VDI Verlag, Düsseldorf 1976
- [11] Kostkowski E.: *Promieniowanie cieplne*. PWN, Warszawa 1993