Wpływ technologii i wybranych warunków pogodowych na wykonanie nawierzchni asfaltowych

ADAM LIPHARDT

Politechnika Warszawska
a.liphardt@il.pw.edu.pl

KAROL J. KOWALSKI

Politechnika Warszawska
k.kowalski@il.pw.edu.pl

Warunki, w jakich wbudowywane są mieszanki mineralno-asfaltowe (mma), odgrywają znaczącą rolę w kształtowaniu właściwości przyszłej nawierzchni drogowej. Uzyskanie właściwej jakości nawierzchni uzależnione jest w znacznym stopniu od prawidłowego zagęszczenia poszczególnych warstw, które możliwe jest jedynie przy zachowaniu odpowiednich wartości temperatury technologicznej. W warunkach obniżonej temperatury wystąpić mogą problemy z zagęszczeniem mieszanek mineralno-asfaltowych**.**

Podstawowym elementem procesu wbudowywania mma, decydującym o uzyskaniu zakładanych właściwości, jest jej zagęszczanie. Dotychczasowe doświadczenia [8] związane z wykonywaniem nawierzchni asfaltowych wskazują, że zagęszczanie mieszanek mineralno-asfaltowych może być skuteczne jedynie przy zachowaniu odpowiednio wysokiej temperatury mma zapewniającej właściwą lepkość lepiszcza. Uzyskanie zakładanego zagęszczenia zależy nie tylko od zastosowanego sprzętu, ale również od czasu w jakim mieszanka utrzymuje zalecaną temperaturę. Czas ten w znacznym stopniu jest zależny od warunków atmosferycznych, w jakich mieszanka jest rozkładana.

Praktyka wykonawcza zarówno w Polsce, jak i w krajach o podobnym klimacie wskazuje, że wydłużenie sezonu robót nawierzchniowych na okres późnojesienny jest często nieuniknione. Dążenie do skracania czasu wykonania inwestycji oraz konieczność nadrabiania opóźnień powstających w trakcie ich realizacji powodują, że przy panujących w Polsce warunkach klimatycznych oraz jej położeniu geograficznym, sezon prowadzenia prac asfaltowych wyznaczony ograniczeniami specyfikacji w wielu przypadkach jest przekraczany. Obecnie istnieją możliwości prawidłowego wykonania nawierzchni w obniżonej temperaturze, co potwierdzają liczne doświadczenia praktyczne oraz prowadzone badania [3,6,7]. Przykładem rozwiązania umożliwiającego wbudowywanie mma w obniżonej temperaturze może być technologia nazywana „gorące na gorące", polegająca na jednoczesnym wbudowywaniu dwóch warstw asfaltowych (najczęściej ścieralnej i wiążącej) przy użyciu specjalnego rozścielacza (np. technologia *Compact-Asphalt*) lub zespołu rozścielaczy (np. technologia *InLine Pave*). Innym z możliwych do zastosowania rozwiązań jest technologia WMA (*Warm Mix Asphalt*), pozwalająca obniżyć temperatury technologiczne lepiszcza dzięki zastosowaniu dodatków, np. wosków syntetycznych [4, 5, 6, 11]. Najpowszechniej obecnie stosowanym rozwiązaniem jest ogrzewanie przy użyciu promienników podczerwieni podłoża, na którym rozkładana będzie mieszanka mineralno-asfaltowa.

Wykonywanie nawierzchni asfaltowych w obniżonej temperaturze obarczone jest dużym ryzykiem pogorszenia ich jakości, co może skutkować przedwczesnym powstaniem uszkodzeń. Dlatego też przed rozpoczęciem wbudowywania konieczne jest dokonanie oceny, czy w danych warunkach atmosferycznych warstwa asfaltowa o określonych parametrach może być poprawnie zagęszczona.

Wpływ temperatury na skuteczność zagęszczania mma

Zagęszczanie mieszanek mineralno-asfaltowych

Proces zagęszczania polega na wzajemnej reorientacji ziaren kruszywa pod wpływem sił ścinających wywołanych obciążeniem – w pierwszej kolejności deski wibracyjnej rozkładarki a następnie bębnów lub kół walców. Siły ścinające muszą pokonać opory wywołane tarciem pomiędzy cząstkami kruszywa, jednocześnie nie powodując kruszenia ziaren. Błonka lepiszcza, którą otoczone są poszczególne ziarna, pełni funkcję smaru, ułatwiającego ich wzajemne przemieszczanie i zapobiegającego ich kruszeniu. Asfalt może spełnić tę funkcję jedynie przy zachowaniu odpowiednio niskiej lepkości [2]. Mieszanka mineralno-asfaltowa w wyniku zagęszczania powinna osiągnąć zakładaną w projekcie, optymalną zawartość wolnych przestrzeni, dzięki czemu uzyskuje projektowane właściwości techniczne (moduł sztywności, odporność na działanie wody i mrozu, etc.) [10]. Zagęszczanie umożliwia także właściwe zaklinowanie się ziaren szkieletu mineralnego, co decyduje o odporności mma na odkształcenia.

Temperatura i czas zagęszczania

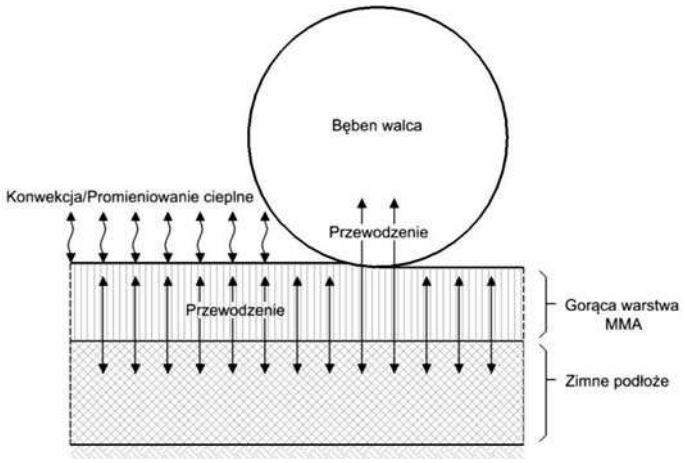
Skuteczność zagęszczania w znacznym stopniu zależy zatem od temperatury, w jakiej jest ono realizowane. Zakres temperatury, w jakim powinno odbywać się zagęszczanie, wyznacza temperatura graniczna:

- *temperatura początku zagęszczania* – maksymalna temperatura, w jakiej możliwe jest rozpoczęcie zagęszczania przy użyciu walców drogowych; przyjmuje się, że jest to temperatura, w której lepkość dynamiczna lepiszcza asfaltowego wynosi 2 Pa·s [12];
- *temperatura końca efektywnego zagęszczania* – minimalna temperatura, w jakiej możliwe jest skuteczne zagęszczanie mma; przyjmuje się, że jest to temperatura, w której lepkość dynamiczna lepiszcza asfaltowego wynosi 20 Pa·s [12];

Czas, w jakim następuje schłodzenie wbudowywanej warstwy od temperatury początku zagęszczania do temperatury końca efektywnego zagęszczania jest to tzw. dostępny czas zagęszczania.

Warunki wbudowywania – mechanizm wychładzania warstwy mma

Spadek temperatury zagęszczanej mieszanki mineralno-asfaltowej zachodzi w wyniku przepływu ciepła w warstwie i jego wymiany z otoczeniem w wyniku przewodzenia, konwekcji oraz promieniowania (rysunek 1) [7].



Rys. 1. Mechanizm wychładzania warstwy z mma

Zjawisko przewodzenia zachodzi wewnątrz rozkładanej warstwy (w stanie nieustalonym), a także między gorącą warstwą i zimnym podłożem oraz elementami maszyn zagęszczających (bębny walców, deska rozkładarki). Wymianę ciepła przez górną powierzchnię warstwy z powietrzem i wodą opisują zjawiska konwekcji i promieniowania.

Intensywność każdego z trzech zjawisk zależy od czynników, które można podzielić na dwie grupy [7, 10]:

Czynniki związane z wpływem otoczenia i warunków atmosferycznych:

- *temperatura powietrza i temperatura podłoża* – szybkość i intensywność oddawania ciepła przez mieszankę jest tym większa, im większa jest różnica temperatury między powierzchnią mieszanki a stykającą się z nią warstwą powietrza lub podłożem,
- *prędkość wiatru* – duża prędkość przepływu powietrza nad rozłożoną warstwą zwiększa intensywność poboru ciepła z jej powierzchni,
- *nasłonecznienie* – stopień nasłonecznienia (zachmurzenia) decyduje o gęstości strumienia promieniowania słonecznego, przez co wpływa na ilość ciepła docierającego do rozkładanej warstwy i podłoża,
- *woda* – w chwili zetknięcia z gorącą mieszanką mineralno-asfaltową woda (występująca na podłożu lub pochodząca z przelotnych opadów atmosferycznych) ulega gwałtownemu ogrzaniu i odparowaniu, w wyniku czego pobiera z mieszanki duże ilości ciepła.

Czynniki wynikające ze specyfiki wbudowywanej warstwy i parametrów procesu zagęszczania:

- *grubość warstwy* – im cieńsza jest wbudowywana warstwa, tym mniejsza jest jej pojemność cieplna. Wraz ze spadkiem grubości warstwy maleje także dystans, jaki musi pokonać ciepło na skutek przewodzenia, wzrasta natomiast znaczenie czynników oddziaływujących na warstwę powierzchniowo, takich jak wiatr, woda czy zimne podłoże,
- *rodzaj użytych walców* – walce stalowe powodują szybsze chłodzenie powierzchni rozłożonej mieszanki niż walce ogumione, co jest wynikiem znacznie większej przewodności cieplnej stali niż gumy. Ponadto bębny walców stalowych zraszane są wodą, która oddziałując na gorącą warstwę dodatkowo powoduje obniżenie temperatury,
- *zagęszczanie* – podczas zagęszczania następuje zmniejszenie grubości warstwy przy jednoczesnym zwiększeniu jej gęstości, w efekcie zwiększeniu ulega przewodność cieplna zagęszczanej warstwy. Szacuje się, że współczynnik przewodzenia ciepła może wynosić [1]:
  - 1,04 W/m·K – po wstępnym zagęszczeniu przez rozkładarkę,
  - 1,56 W/m·K – po ostatecznym zagęszczeniu.

W celu poprawy warunków wbudowywania mieszanki mineralno-asfaltowej, w czasie występowania obniżonej temperatury powietrza stosuje się m.in. specjalne podajniki MTV (*Material Transfer Vehicle*), nazywane również *Shuttle Buggy*. Jest to sprzęt wykorzystywany również do ujednorodnienia materiału pod względem jego składu i temperatury, a także stosowany celem uzyskania lepszych parametrów techniczno-eksploatacyjnych samej warstwy (równość) [10]. Technologia jednoczesnego wbudowywania dwóch warstw nawierzchni („gorące na gorące") to technologia WMA [4, 5, 6, 11].

Wytyczne i zalecenia dotyczące warunków wykonywania nawierzchni asfaltowych

W Polsce od czasu wycofania normy PN-S 96025:2000 oraz wymagań technicznych WT-2 z 2008 roku nie ma nadrzędnego, ogólnego dokumentu opisującego warunki wbudowywania mieszanki mineralno-asfaltowej. Zapis dotyczący temperatury otoczenia zamieszczony został ostatnio w opracowanym w 2014 roku projekcie wymagań technicznych WT-2 2014 cz. 2: „Wykonanie warstw nawierzchni z mieszanek mineralno-asfaltowych i z betonu cementowego" [14]. We wrześniu 2014 roku zatwierdzona i opublikowana została pierwsza część wymagań technicznych WT-2 2014 „Mieszanki mineralno-asfaltowe".

Obecnie dokumentami zawierającymi wymagania w zakresie warunków wbudowywania są Specyfikacje Techniczne Wykonania i Odbioru Robót (STWiOR) poszczególnych warstw nawierzchni, opracowane przez Branżowy Zakład Doświadczalny Budownictwa Drogowego i Mostowego na podstawie normy europejskiej oraz WT-2 2008 [15]. W tabeli 1 przedstawiono wymagania w stosunku do wybranych warstw asfaltowych zawarte w aktualnych wydaniach Ogólnych Specyfikacjach Technicznych Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych (OST D-05.03.05a, D-05.03.05b, D-05.03.13a).

Tabela 1. **Minimalna temperatura otoczenia na wysokości 2 m podczas wykonywania warstw asfaltowych wg STWiOR**

Rodzaje robót	Minimalna temperatura otoczenia [°C]		Minimalna temperatura podłoża [°C]
	Przed przystąpieniem do robót	W czasie robót	
Warstwa ścieralna z AC o grubości ≥ 3 cm	0	+5	+5
Warstwa ścieralna z AC o grubości < 3 cm	+5	+10	
Warstwa ścieralna z SMA o grubości ≥ 3 cm	0	+5	+5
Warstwa ścieralna z SMA o grubości < 3 cm	+5	+10	
Warstwa wiążąca lub wyrównawcza z AC	0	+5	+5
Warstwa podbudowy z AC	0	+5	+5

Przedstawiona w tabeli 1 temperatura otoczenia może być niższa w przypadku ogrzewania podłoża. Specyfikacje techniczne nie dopuszczają wbudowywania mieszanki mineralno-asfaltowej przy prędkości wiatru > 16 m/s. W przypadku zastosowania środków obniżających temperaturę wbudowywania specyfikacje zalecają indywidualnie określić wymagane warunki otoczenia.

Zastosowanie programu komputerowego do oceny możliwości zagęszczenia mma w warunkach obniżonej temperatury

W celu dokonania oceny możliwości wykonywania nawierzchni z mieszanek mineralno-asfaltowych w niesprzyjających warunkach atmosferycznych, przeprowadzono analizę polegającą na sprawdzeniu możliwości wydłużenia dostępnego czasu zagęszczania w wyniku zastosowania różnych rozwiązań technologicznych.

Zasadniczym elementem przeprowadzonych analiz było wyznaczenie dostępnych czasów zagęszczania na podstawie symulacji chłodzenia wbudowywanej warstwy, do których wykorzystano program komputerowy o nazwie MultiCool opracowany na Uniwersytecie w Minnesocie przy współpracy z Minnesota Department of Transportation [2].

Program ten na podstawie określonych warunków otoczenia (temperatury powietrza, temperatury i stanu zawilgocenia podłoża, prędkości wiatru i in.) oraz parametrów wbudowywanej warstwy (grubość, rodzaj mma i in.) wyznacza tzw. krzywą chłodzenia zagęszczanej warstwy, z której odczytać można dostępny w danych warunkach czas zagęszczania.

Przebieg analizy dotyczącej wpływu warunków wbudowywania na skuteczność zagęszczania warstw mma

W trakcie wykonywania analiz przyjęto niekorzystne warunki otoczenia oraz sprawdzono wpływ zastosowania zróżnicowanych rozwiązań materiałowo-technologicznych na wydłużenie czasu zagęszczania warstwy asfaltowej. Symulację procesów technologicznych przeprowadzono w następujący sposób:

1. *Przyjęcie założeń w zakresie warunków atmosferycznych* – założono niekorzystne warunki: temperatura powietrza i podłoża równa 5°C oraz prędkość wiatru w zakresie 0÷16 m/s.

2. *Przyjęcie założeń konstrukcyjno-materiałowych* – przeprowadzono **s**ymulację chłodzenia warstwy ścieralnej z mieszanki betonu asfaltowego (AC) rozkładanej na warstwie wiążącej z AC o grubości 8 cm. Grubość warstwy ścieralnej po zagęszczeniu przyjęto równą 4 cm. Jako alternatywę przyjęto konstrukcję nawierzchni wykonaną w technologii warstwy kompaktowej o całkowitej grubości 10 cm, na którą składa się:
- warstwa ścieralna o grubości 2 cm,
- warstwa wiążąca o grubości 8 cm (rozkładana na warstwie podbudowy z AC o grubości 10 cm).

W celu umożliwienia porównania wyników założono, że analizowane warstwy zarówno w technologii tradycyjnej, jak i w technologii „gorące na gorące" wykonywane są z mieszanki AC zawierającej lepiszcze w postaci asfaltu drogowego 50/70.

3. *Przyjęcie założeń technologii zagęszczania:*
- szerokość rozkładanej działki roboczej: s = 7,00 m;
- prędkość rozkładarki – 3 m/min;
- zastosowane walce:
  - 2 walce stalowe tandemowe z wibracją o ciężarze 8÷10 Mg (przywałowanie),
  - 2 walce stalowe tandemowe z wibracją o ciężarze 8÷10 Mg (zagęszczanie właściwe),
  - 2 walce stalowe tandemowe z wibracją o ciężarze 10÷14 Mg (wygładzanie).

4. *Wyznaczenie temperatury technologicznej* – temperatury technologiczne asfaltu wyznaczono na podstawie analizy wykresu zależności lepkości dynamicznej od temperatury pomiaru. Pomiary lepkości, których wyniki posłużyły do wyznaczenia granicznych temperatur zagęszczania, przeprowadzone zostały w przypadku asfaltu poddanego starzeniu

metodą RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test*). Lepkości asfaltu przedstawione w tabeli 2 wyznaczono za pomocą lepkościomierza Brookfielda.

Tabela 2. **Temperatury technologiczne asfaltu drogowego 50/70**

Proces technologiczny	Temperatura [°C]	Lepkość [Pa·s]
Otaczanie kruszywa	153	0,2
Początek zagęszczania	119	2,0
Koniec zagęszczania	91	20,0

5. *Przyjęcie technologii wykonania nawierzchni i oszacowanie minimalnego koniecznego czasu zagęszczania.* Minimalny konieczny czas zagęszczania jest to najkrótszy czas, w którym możliwe jest zagęszczenie określonego odcinka warstwy z mma przy użyciu założonego zestawu walców. Na podstawie badań polowych przyjęto, że minimalny, konieczny czas zagęszczania wynosi ok. 9 min w przypadku technologii tradycyjnej oraz 11,5 min w przypadku technologii „gorące na gorące". Znajomość minimalnego czasu, w którym możliwe jest prawidłowe zawałowanie mma pozwoliło ocenić, czy dostępny czas zagęszczania uzyskany w określonych warunkach przy określonej technologii jest wystarczający do zagęszczenia mieszanki przyjętym zestawem walców.

6. *Przeprowadzenie symulacji chłodzenia wbudowywanej warstwy i wyznaczenie krzywych chłodzenia oraz dostępnych czasów zagęszczania analizowanych wariantów.* Analizy wykonano korzystając ze specjalistycznego programu komputerowego, pozwalającego określić spadki temperatury we wbudowywanej gorącej mma w zakresie pomiędzy 119 a 91°C. Spadek temperatury w czasie obliczany był w stosunku do punktu położonego w połowie grubości każdej z wbudowywanych warstw.

Ocena efektywności rozwiązań technologicznych

Oceną objęto następujące warianty wbudowania mieszanki mineralno-asfaltowej pozwalające na wydłużenie dostępnego czasu zagęszczania:

- zwiększenie grubości warstwy,
- ogrzanie podłoża,
- jednoczesne zastosowanie powyższych rozwiązań (zwiększenie grubości warstwy i ogrzanie podłoża),
- wbudowanie warstwy ścieralnej i wiążącej w technologii gorące na gorące.

Zwiększenie grubości warstwy

Ocenie poddano wpływ nieznacznego zwiększenia grubości warstwy na szybkość jej stygnięcia (w zakresie typowym w przypadku warstw ścieralnych: 4÷5 cm).

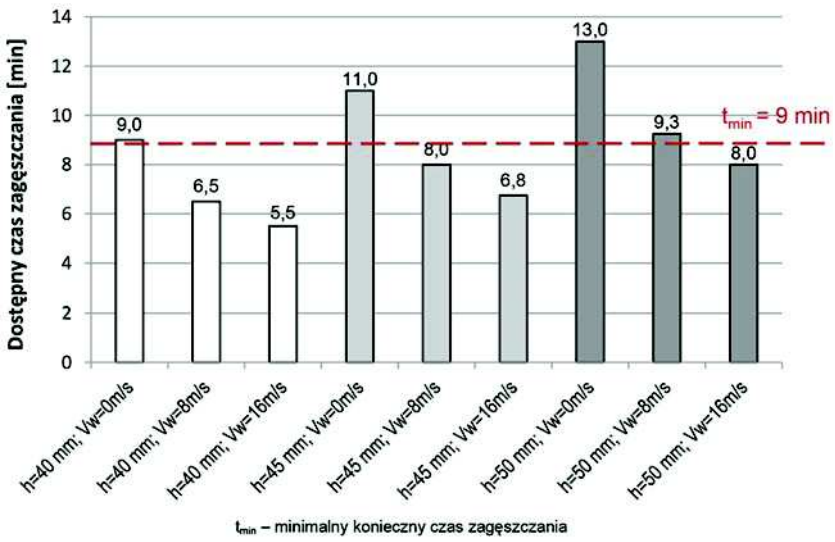
Porównując obliczone dostępne czasy zagęszczania przedstawione na rysunku 2 stwierdzono, że zwiększenie grubości warstwy o 0,5 cm powoduje wydłużenie dostępnego czasu zagęszczania od 1 do 2 min, przy czym największe wydłużenie (2 min) obserwuje się w warunkach bezwietrznych, a najmniejsze (1 min) przy maksymalnej dopuszczalnej prędkości wiatru równej 16 m/s. Spełnienie warunku minimalnego koniecznego czasu zagęszczania udało się uzyskać w przypadku grubości warstwy 4,5 cm jedynie w warunkach bezwietrznych, natomiast w przypadku grubości warstwy 5 cm do wszystkich założonych warunków otoczenia za wyjątkiem prędkości wiatru powyżej 10 m/s.

Ogrzewanie podłoża

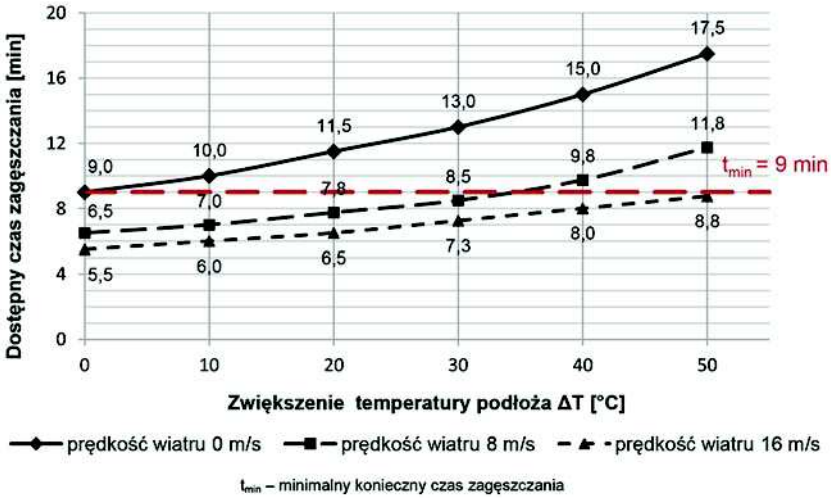
Drugim analizowanym rozwiązaniem technologicznym było ogrzewanie za pomocą promiennika podczerwieni podłoża, na którym rozkładana jest warstwa ścieralna (fot.1). Ocenie poddano wpływ ogrzania podłoża w zakresie temperatury od 5 do 55 °C (zwiększając temperaturę w kolejnych krokach o 10°C), na wydłużenie dostępnego czasu zagęszczania.

Fot.1. Widok nagrzewnicy w promiennikami ciepła [13]

Na podstawie analizy wyników przeprowadzonej symulacji stwierdzono, że wraz ze wzrostem temperatury podłoża



Rys. 2. Dostępne czasy zagęszczania uzyskane do różnych grubości warstwy (h) i prędkości wiatru (V_w) w temperaturze otoczenia T = 5 °C i całkowitym zachmurzeniu

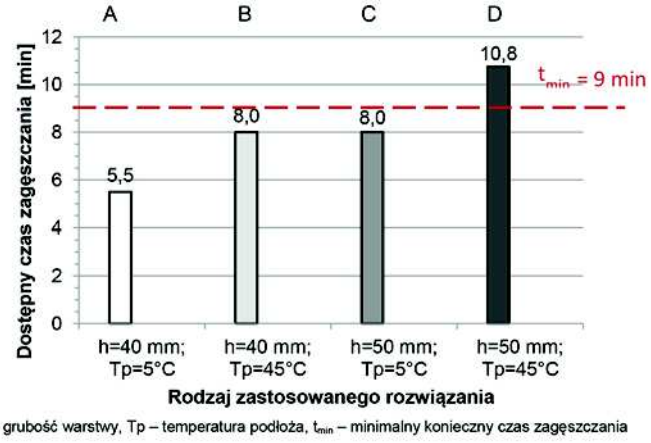


Rys. 3. Wykres zależności dostępnego czasu zagęszczania od zwiększenia temperatury podłoża przy temperaturze otoczenia T = 5°C i całkowitym zachmurzeniu

następuje wydłużenie dostępnego czasu zagęszczania, jednak rozwiązanie to jest najbardziej efektywne przy bezwietrznej pogodzie lub niskiej prędkości wiatru. Przy dużych prędkościach wiatru efektywność ogrzewania podłoża znacznie spada (rys. 3).

Łączne zastosowanie ogrzewania podłoża i zwiększenia grubości warstwy

Ocenie poddano również wariant, w którym zastosowano łącznie wymienione wcześniej rozwiązania. Symulacji poddano warstwę o grubości zwiększonej do 50 mm rozkładaną na podłożu ogrzanym do 45°C, przy prędkości wiatru 16 m/s. Porównując dostępne czasy zagęszczania uzyskane w przypadku rozwiązań zastosowanych osobno, z czasem uzyskanym przy jednoczesnym zwiększeniu grubości warstwy i ogrzaniu podłoża, stwierdzono, że dzięki jednoczesnemu zastosowaniu obu rozwiązań dostępny czas zagęszczania wydłużył się o prawie trzy minuty (to jest o ok. 35%). Samo ogrzanie podłoża, jak i zwiększenie grubości warstwy, nie zapewniało spełnienia warunku minimalnego koniecznego czasu zagęszczania (rys. 4).



Rys. 4. Porównanie czasów zagęszczania: warstwy wbudowywanej bez dodatkowych zabiegów technologicznych (A), warstwy o gr. 4 cm rozkładanej na ogrzanym podłożu (B), warstwy o gr. zwiększonej do 5 cm rozkładanej na zimnym podłożu (C) oraz warstwy o gr. zwiększonej do 5 cm rozkładanej na ogrzanym podłożu (D)

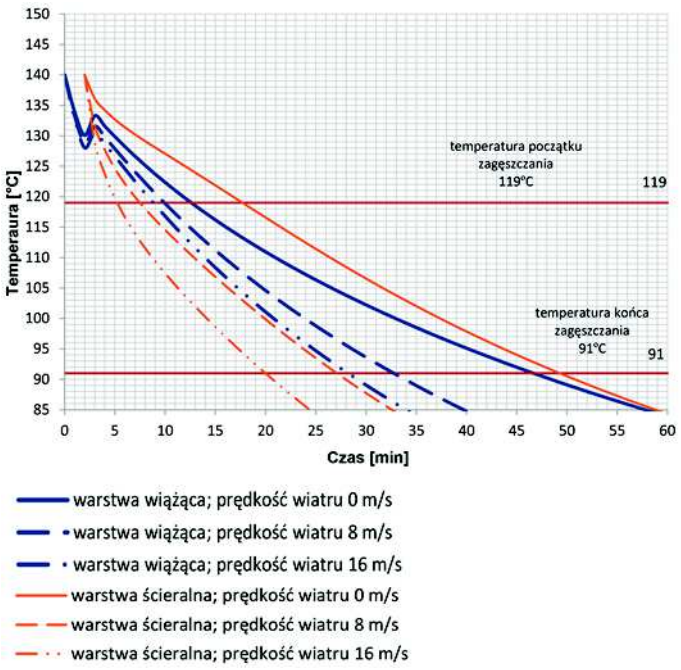
Technologia „gorące na gorące”

Ostatnim z analizowanych rozwiązań, mającym umożliwić wbudowanie nawierzchni w obniżonej temperaturze była technologia „gorące na gorące”. Aby przeanalizować możliwie najniekorzystniejsze warunki wbudowania warstwy w technologii „gorące na gorące” założono, że będzie ona wykonywana przy użyciu dwóch rozkładarek, w przypadku których odległość między stołami zagęszczającymi wynosi ok. 7 m (fot. 2). Przy założonej prędkości rozkładania równej 3 m/min warstwa ścieralna rozkładana jest ok. 2 min. po warstwie ścieralnej.

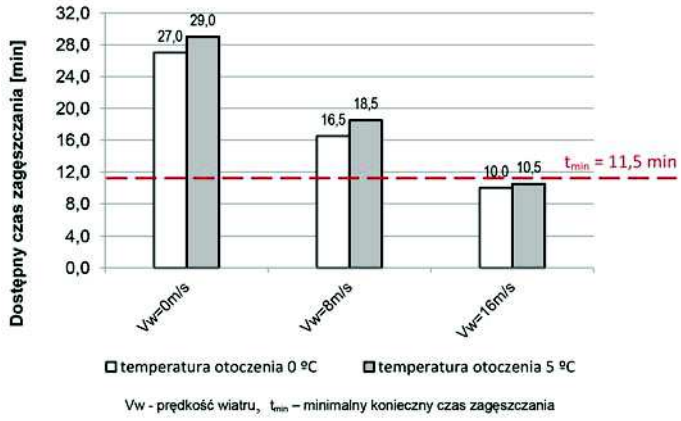
Fot. 2. Jednoczesne wykonywanie warstw wiążącej i ścieralnej w technologii InLine Pave [13]

Na rysunku 5 przedstawiono wyniki symulacji chłodzenia warstwy kompaktowej o łącznej grubości 10 cm. Analizując przebieg krzywej w przypadku warstwy wiążącej, można zaobserwować spadek temperatury wynoszący ok. 10 ÷ 12°C następujący do momentu rozłożenia warstwy ścieralnej, a następnie chwilowy wzrost temperatury związany z przykryciem przez gorącą warstwę ścieralną, po którym następuje dalszy równomierny spadek temperatury obydwu warstw.

Zestawienie dostępnych czasów zagęszczania przedstawione na rysunku 6 wskazuje, że technologia „gorące na gorące” umożliwia prawidłowe zagęszczenie warstw nawierzchni w temperaturze otoczenia równej 0°C i przy wietrze o prędkości około 8 m/s – ze znacznym zapasem dostępnego czasu zagęszczania. Jedynie w bardzo niekorzystnych warunkach, tzn. przy prędkości wiatru 16 m/s



Rys. 5. Krzywe chłodzenia warstwy kompaktowej w przypadku różnych prędkości wiatru, w temperaturze otoczenia T_0 = 5 °C i przy całkowitym zachmurzeniu



Rys. 6. Dostępne czasy zagęszczania warstwy kompaktowej o grubości 8 cm

i temperaturze otoczenia równej 0°C, technologia ta nie zapewnia wystarczająco długiego czasu na prawidłowe zagęszczenie warstw. Podkreślić należy, że takiego rezultatu nie uzyskano w przypadku żadnego z pozostałych analizowanych wariantów.

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że największy wpływ na szybkość stygnięcia wbudowywanej warstwy asfaltowej spośród analizowanych czynników mają prędkość wiatru oraz grubość warstwy. W szczególności sformułować można następujące wnioski:

1. Znajomość dostępnego czasu zagęszczania pozwala dobrać odpowiedni rodzaj oraz ilość sprzętu zagęszczającego, a także stanowi pomoc w podejmowaniu decyzji o rozpoczęciu bądź wstrzymaniu prac w warunkach obniżonej temperatury i przy dużej prędkości wiatru.
2. Zarówno rozwiązanie w postaci ogrzewania podłoża, jak i nieznacznego zwiększenia grubości warstwy charakteryzują się podobną efektywnością w wydłużeniu dostępnego czasu zagęszczania, jednakże wymagany minimalny konieczny czas zagęszczania mogą zapewnić tylko przy stosunkowo niskiej prędkości wiatru (poniżej 8 m/s).
3. Przeprowadzona analiza dowiodła, że spośród badanych rozwiązań technologia „gorące na gorące" jest najefektywniejsza w zakresie możliwości wydłużenia dostępnego czasu zagęszczania. Dzięki większej pojemności cieplnej warstwy kompaktowej, jej stygnięcie jest znacznie wolniejsze niż warstwy ścieralnej wbudowywanej w technologii tradycyjnej.

Bibliografia

[1] K. Błażejewski: SMA. *Teoria i praktyka*. Rettenmaier Polska, Warszawa 2007
[2] B. Chadboum i inni, praca zbiorowa: *An asphalt paving tool for adverse conditions. Final report.* University of Minnesota Department of Civil Engineering, June 1998
[3] A. Janczak: *Układanie nawierzchni w niskiej temperaturze*. Nowości zagranicznej techniki drogowej nr 166/2006
[4] J. Król, K. Matraszek, J. Piłat, P. Radziszewski, K. Kowalski: *Właściwości lepiszczy asfaltowych modyfikowanych parafinami nowej generacji. Projekt MMAC – cz. 1.* Magazyn Autostrady 5/2011
[5] J. Król, P. Radziszewski, J. Piłat, K. Kowalski, K. Matraszek: *Technologie WMA w aspekcie modyfikacji właściwości lepiszczy asfaltowych. Projekt MMAC – cz. 2.* Magazyn Autostrady 7/2011
[6] J. Król, K. Kowalski, P. Radziszewski, J. Piłat, M. Sarnowski, P. Świeżewski: *Influence of WMA wax modifier melting point on bitumen viscosity.* 5th European asphalt technology association conference- EATA, Braunschweig, 2013
[7] P. Mieczkowski: *Zagęszczanie mma w cienkich warstwach. Uwarunkowania cieplne.* Magazyn Autostrady 10/2006
[8] J. Piłat, P. Radziszewski: *Nawierzchnie asfaltowe*. WKŁ, Warszawa 2010
[9] W. Spuziak: *Wykonywanie drogowych robót nawierzchniowych w niskiej temperaturze*. Drogownictwo 7/2000
[10] B. Stefańczyk, P. Mieczkowski: *Mieszanki mineralno-asfaltowe. Wykonawstwo i badania*. WKŁ, Warszawa 2008
[11] M. Stienss, J. Judycki: *Mieszanki mineralno-asfaltowe na ciepło – przegląd dodatków.* Drogownictwo 7-8/2010
[12] R. West, D. Watson, P. Turner, J. Casola: *Mixing and Compaction Temperatures of Asphalt Binders in Hot-Mix Asphalt.* National Cooperative Highway Research Program, Report 648, Washington D.C. 2010
[13] A. Zofka, D. Maliszewska, M. Maliszewski, D. Sybilski: *Wpływ zastosowania maszyn podających mieszankę na jakość nawierzchni asfaltowej*. Drogownictwo 11/2013
[14] WT-2, Wymagania Techniczne - Nawierzchnie asfaltowe 2014, Warszawa 2014, zamieszczone w Internecie*: http://www.gddkia.gov.pl/pl/1118/dokumenty-techniczne* - dostęp 9.09.2014
[15] Branżowy Zakład Doświadczalny Budownictwa Drogowego i Mostowego *http://www.drogowa.strefa.pl/* dostęp 9.09.2014
[16] Materiały informacyjne firmy Wirtgen. Zamieszczone w Internecie: http://www.wirtgen-group.com