



MARIUSZ JACZEWSKI

Politechnika Gdańska
mariusz.jaczewski@
pg.edu.pl

Przegląd nanododatków stosowanych w warstwach asfaltowych nawierzchni drogowych

Nanotechnologia jest działem nauki zajmującym się produkcją, interakcjami oraz wykorzystaniem materiałów, których przynajmniej jeden wymiar mieści się w granicach wartości rzędu 10^{-9} m. W literaturze technicznej dot. tego zagadnienia część badaczy podaje również bardziej rygorystyczną definicję – wymiar ten powinien mieścić się do wartości 100 lub 200×10^{-9} m [1], [2]. W przypadkach szczególnych – na przykład w odniesieniu do nanocząstek wapna hydratyzowanego [3] wartości te mogą być jednak 2- lub 3-krotnie większe.

Za początek nanotechnologii przyjmuje się rok 1959. Laureat Nagrody Nobla Richard Feynman wygłosił wówczas wykład pod tytułem „Jest wiele miejsc tam na dole” [1], [4]. Od tego czasu, tzn. w okresie niemal 60 lat, w różnych dziedzinach nauki nastąpił znaczny rozwój nanotechnologii. W przypadku budownictwa rozwój nanotechnologii przypada na początek XXI wieku [5], [6], a w przypadku budownictwa drogowego za początek przyjmuje się rok 2010 [3], [7]–[9]. W Polsce, w przypadku budownictwa ogólnego, a szczególnie technologii betonu [1], [2] zagadnienia nanotechnologii są rozwijane od podobnego okresu jak ma to miejsce na świecie, natomiast w budownictwie drogowym, zagadnienia te są niemal całkowicie pomijane i skupiają się głównie na nowoczesnych środkach adhezyjnych [10], [11].

Rzeczywisty rozwój nanotechnologii w pozostałych dziedzinach nauki jest rozłożony w miarę równomiernie we wszystkich krajach na świecie, natomiast w przypadku zastosowań w budownictwie drogowym główne ośrodki badań są zlokalizowane w sposób zaskakujący. Poza światowymi liderami w tej dziedzinie, czyli Stanami Zjednoczonymi i Chinami, rozwój nanotechnologii jest najszybszy w Azji Południowo-Wschodniej oraz na Bliskim Wschodzie, szczególnie w krajach rozwijających się, takich jak Indie, Iran czy Malezja, a także w Rosji. W Europie można mówić jedynie o pojedynczych publikacjach. Jak wynika z tego, jest to nadal dziedzina w początkowym stadium rozwoju i naśladuje głównie rozwiązania z innych gałęzi budownictwa. W chwili obecnej głównym kierunkiem nanotechnologii w budownictwie drogowym jest modyfikacja asfaltu nanododatkami, czy to w postaci nanocząstek (najczęściej są to cząstki tlenków metali, których wszystkie wymiary mieszczą się w skali nanometrycznej), nanorurek, nanowłókien. Najczęściej nanorurki lub nanowłókna węglowe to takie dodatki, gdzie dwa wymiary mieszczą się w skali nanometrycznej, a jeden z nich może być większy. Można wymienić również bardziej skomplikowane struktury w postaci na przykład nanopłytek, gdzie tylko jeden z wymiarów mieści się w skali nanometrycznej.

W niniejszym artykule przedstawiono najczęściej stosowane nanododatki do modyfikacji lepiszczy asfaltowych, ich wpływ na podstawowe cechy, bariery mogące być przeszkodą w ich wprowadzeniu, a także potencjalne zastosowania, które mogą być wykorzystywane przy dalszym rozwoju tej dziedziny.

Nanododatki stosowane w modyfikacji asfaltów oraz mieszanek mineralno-asfaltowych

Nanododatki stosowane w modyfikacji lepiszczy asfaltowych można podzielić na trzy zasadnicze grupy w zależności od ilości wymiarów, które przyjmują wymiar w skali nano. Są to odpowiednio: nanocząstki, nanowłókna oraz nanopłytki. Do pierwszej grupy zaliczyć można przede wszystkim nanocząstki tlenków metali, z których najpowszechniej wykorzystywane są nanocząstki dwutlenku krzemu SiO_2 oraz nanocząstki dwutlenku tytanu TiO_2 . Wybór ten związany jest najprawdopodobniej z powszechnym zastosowaniem tych dwóch grup nanocząstek w innych gałęziach przemysłu a także budownictwa, szczególnie w technologii betonu cementowego. Drugą grupę nanododatków stanowią nanorurki węglowe jedno- względnie wielościennie, które w materiałach bitumicznych mają pełnić rolę zbrojenia rozproszonego. Do ostatniej trzeciej grupy zaliczyć można natomiast różnego rodzaju nanoglinki, których proces produkcji powoduje utworzenie warstwowej struktury dodatku, gdzie poszczególne warstwy mają grubość w skali nano, natomiast odległości pomiędzy poszczególnymi warstwami pozwalają na odpowiednią homogenizację z materiałem modyfikowanym.

Nanocząstki

W literaturze technicznej można znaleźć wiele rodzajów nanocząstek wykorzystywanych w budownictwie [3], [7]–[9]. Najczęściej są to nanocząstki metali lub tlenków metali, chociaż można znaleźć pojedyncze zastosowanie także nanocząstek innych związków chemicznych. Do modyfikacji lepiszcza asfaltowego najczęściej stosuje się dwie nanocząstki tlenków metali – dwutlenku krzemu oraz dwutlenku tytanu [12].

Dwutlenek krzemu SiO_2 – stosowany jest przede wszystkim w technologii betonu cementowego. Zastosowanie małych wymiarów cząstki powoduje znaczące zwiększenie powierzchni właściwej materiału, co wpływa korzystnie na zmniejszenie wskaźnika w/c, a tym samym na możliwość

znaczącej poprawy wytrzymałości betonu. Powszechne stosowanie w pokrewnej dziedzinie spowodowało liczne próby zastosowania związku do modyfikacji lepiszcza asfaltowego [13]–[21]. W badaniach laboratoryjnych stosuje się najczęściej cząstki o wymiarach do 60 nm. Typowy zakres modyfikacji zawiera się pomiędzy 0,1 a 6,0%. Większość z przeprowadzonych dotychczas badań dotyczy właściwości samego lepiszcza, choć pojedyncze badania przedstawiają także wpływ nanododatku na parametry mieszanek mineralno-asfaltowych.

W zakresie cech podstawowych to dodatek nanocząstek dwutlenku krzemu w zakresie właściwości normowych wg PN-EN: powoduje obniżenie penetracji od 20 do 50% [14], [15], wzrost temperatury mięknięcia do 5°C [14], [15]. W przypadku oceny asfaltów z wykorzystaniem metodyki opracowanej w programie badawczym SHRP (*Strategic Highway Research Program*), uzyskane wyniki są niejednoznaczne. O ile część badaczy wykazuje brak wpływu dodatku na wyniki badań prowadzonych w urządzeniach DSR (*Dynamic Shear Rheometer* – reometr dynamicznego ścinania) oraz BBR (*Bending Beam Rheometer* – reometr zginanej belki) [15], pozostałe badania wykazują przesunięcie właściwości w obszar związany z poprawą właściwości wysokotemperaturowych [13]: podwyższają wartość parametru G^* (bez zmian kąta przesunięcia fazowego δ), natomiast pogarszają właściwości niskotemperaturowe (wyższe wartości S i obniżenie wartości parametru „m”). Maksymalny zanotowany spadek sięgał jednej klasy PG w zakresie niskich temperatur.

W przypadku dodatku nanocząstek dwutlenku krzemu z dodatkiem miazgi gumowej zaobserwowano [16]: obniżenie penetracji, zwiększenie temperatury mięknięcia, poprawę właściwości wysokotemperaturowych (zwiększenie sztywności G^* oraz obniżenie kąta przesunięcia fazowego δ oraz nieznaczne tylko pogorszenie właściwości niskotemperaturowych (zwiększenie sztywności S oraz zmniejszenie parametru „m”). Należy tu jednak zauważyć, że wpływ nanocząstki dwutlenku krzemu na właściwości niskotemperaturowe został znacząco ograniczony poprzez dodatek miazgi gumowej.

W mieszankach mineralno-asfaltowych zauważono natomiast, że dodatek nanocząstek dwutlenku krzemu działa korzystnie na poprawę odporności na: starzenie [17], deformacje trwałe (od 4 do 60%) [17], [18], [21], zmęczenie (do 40%) [14], [17] oraz działanie wody i mrozu (wzrost wskaźnika ITSR do poziomu 100%) [14], [15], [17], [18], [20]. W badaniach stwierdzono także wyższe wartości modułu sztywności (do 60%) [14], [17], [20], [21] oraz podwyższoną zdolność do tzw. samoleczenia („healingu”) [19].

Dwutlenek tytanu TiO_2 – stosowany jest przede wszystkim w technologii materiałów w których katalizatorem reakcji jest światło, np. paneli słonecznych, czy też urządzeń oczyszczających powietrze [22] lub wodę [23]. W technologii betonu dwutlenek tytanu stosowany jest ze względu na możliwość tworzenia powłok samoczyszczących, dezynfekujących, a także odpornych na działanie wody [24].

Podobnie jak w przypadku nanocząstek dwutlenku krzemu, dodatek nanocząstki tytanu działa usztywniająco na lepiszcza asfaltowe oraz mieszanek mineralno-asfaltową.

W badaniach laboratoryjnych lepiszcza wykazano: obniżenie wartości penetracji [21], [25], podwyższenie wartości temperatury mięknięcia [21], [25] oraz zwiększenie ciągliwości lepiszcza [25].

W badaniach laboratoryjnych mieszanek mineralno-asfaltowych [17], [21], [25] stwierdzono poprawę odporności na: starzenie, deformacje trwałe (do 50%), działanie wody i mrozu (o około 7%), a także zmęczenie (w zakresie od 25 do 150%). Badania wykazały także wzrost modułu sztywności (do 50%) [17].

Tlenek Cynku ZnO – nanocząstki tlenku cynku wykorzystywane są głównie w przemyśle gumowym w procesie wulkanizacji [26] oraz biomedycznym – jako środek antybakteryjny lub nowoczesne medium do transportu leków [27]. W budownictwie drogowym tlenek cynku wykorzystywany jest najczęściej jako środek adhezyjny [28], [29], ze względu na obniżenie kwasowości asfaltu. Efektem końcowym jest znacząca poprawa odporności na działanie wody i mrozu mieszanek mineralno-asfaltowych. Podobnie jak w przypadku stosowania pozostałych typów nanocząstek stwierdzono usztywnienie lepiszcza, co skutkuje obniżeniem penetracji, i podwyższeniem temperatury mięknięcia. W przypadku testów wykonanych zgodnie z procedurą SHRP zauważono wzrost sztywności oraz zmniejszenie kąta przesunięcia fazowego oraz parametru „m”. W przypadku badań mieszanek mineralno-asfaltowych [29] zauważono nieznaczną poprawę odporności na działanie wody i mrozu, a także odporności na powstawanie deformacji trwałych.

Inne nanocząstki – poza już przedstawionymi najczęściej stosowanymi nanocząstkami, w literaturze technicznej można napotkać także próby poszukiwań innych związków chemicznych, które mogłyby wpłynąć na poprawę właściwości samych asfaltów lub mieszanek mineralno-asfaltowych. Próby takie dotyczą głównie poprawy odporności na działanie wody i mrozu, zmęczenie czy też poprawy odporności na powstawanie deformacji trwałych. Przykładem takich nanocząstek, w których zaobserwowano poprawę jednej lub wszystkich z wymienionych właściwości są: tlenek żelaza(III) Fe_2O_3 [30], tritlenek diglinu Al_2O_3 [31], wodorotlenek wapnia $Ca(OH)_2$ o wymiarach w skali nano [32], a także nanopoliakrylan [33].

Ogólnie zauważyć można, że modyfikacja asfaltów nanocząstkami skutkuje pewnym usztywnieniem lepiszczy asfaltowych, a w konsekwencji również mieszanek mineralno-asfaltowych. W praktycznie każdym badanym przypadku zaobserwowano spadek penetracji względnie wzrost temperatury mięknięcia. Również badania przeprowadzone według metodyki SHRP wykazały wzrost sztywności, występujący zarówno w warunkach niskiej, jak i wysokiej temperatury. Powoduje to, że mieszanki z tak modyfikowanymi asfaltami będą wykazywały poprawę właściwości w warunkach wysokiej temperatury (ciepłego klimatu), gdy podstawowe uszkodzenie nawierzchni stanowią deformacje plastyczne. Znajduje to potwierdzenie w wynikach badań mieszanek mineralno-asfaltowych. Praktycznie w każdym ocenianym przypadku obserwowano poprawę odporności na deformacje trwałe. Skutkuje to jednak pogorszeniem odporności na spękania niskotemperaturowe, w przypadkach w których

było to badane. Aby zniwelować negatywny wpływ wytypowanych na tym etapie rozwoju technologii nanododatków (SiO_2 , CaCO_3 , TiO_2 , Fe_2O_3 , ZnO , nanoglinki) na właściwości niskotemperaturowe, część badających stosuje dodatek polimeru SBS [29], [34] lub mieszanek polimeru SBS z polietylenem PE [34].

Nanowłókna

Nanorurki i nanowłókna są nanostrukturami, w których jeden wymiar jest zdecydowanie większy (dłuższy) od dwóch pozostałych. Spośród wszystkich nanorurek, najbardziej znane są nanorurki węglowe. Są one odmianą alotropową węgla, charakteryzującą się wysoką wytrzymałością oraz sztywnością, a także wysokim przewodnictwem cieplnym. Właściwości te spowodowały ich powszechne wykorzystanie w optyce, elektronice, jak i technologii materiałów. Najczęściej można je spotkać w dwóch formach: jednościennych nanorurek węglowych (SWCNT) lub wielościennych nanorurek węglowych (MWCNT). W budownictwie, ze względu na swoją wysoką wytrzymałość, nanorurki węglowe wykorzystywane są najczęściej w technologii betonu cementowego [35] jako forma zbrojenia rozproszonego. Ze względu na dobre rezultaty w innych gałęziach budownictwa, także w budownictwie drogowym występują próby zastosowania podanej technologii, w alternatywie do np. włókien aramidowych [36]. Ze względu na bardzo duży koszt nanododatku są to na razie pojedyncze próby [37]–[39]. Pierwsze badania pokazują wyniki zbliżone do przedstawionych wcześniej modyfikacji asfaltu nanocząstkami. W większości przypadków rezultatem oddziaływania jest usztywnienie modyfikowanego lepiszcza, a tym samym poprawa odporności na deformacje trwałe oraz zmęczenie mieszanek mineralno-asfaltowych z omawianym dodatkiem. Na uwagę zasługuje fakt, że nie w każdym przypadku zauważono pogorszenie właściwości niskotemperaturowych. Tsantilis i współpracownicy [39] wykazali, że zależy to również od składu grupowego bazowego lepiszcza. W jednym z trzech przypadków uzyskano również poprawę właściwości niskotemperaturowych przeprowadzanych w badaniu BBR (spadek sztywności, wzrost parametru „m”). Jednak właściwości te pogarszały się wraz ze wzrostem ilości dodatku.

Nanopłytki

Ostatnią z przedstawionych w artykule grup nanododatków stanowią nanopłytki. W tym przypadku jeden z wymiarów (tzn. grubość) występuje w skali nanometrycznej, natomiast pozostałe dwa wymiary mogą być większe. Powoduje to, że powierzchnia właściwa takich materiałów jest bardzo duża w porównaniu do innych nanododatków. Do grupy tej zaliczyć można przede wszystkim nanoglinki (ang. *nanoclays*), chociaż występują także nanopłytki uzyskane z innych związków chemicznych, np. z nanowarstwy grafitu czy grafenu. Grupa ta jest jednak najbardziej zróżnicowana ze wszystkich przedstawionych powyżej, gdyż jej skład chemiczny zależy przede wszystkim od złoża bazowego, z którego został wyprodukowany dany nanododatek. Uzyskiwane wyniki badań mogą być całkowicie przeciw-

stawne. Ze względu na niską cenę oraz łatwą dostępność, jest to obok nanotlenków krzemu oraz nanotlenków tytanu najczęściej stosowany nanododatek do modyfikacji asfaltu. Nanoglinki są formą silikatu warstwowego występującego w budownictwie najczęściej w postaci montmorillonitu (MMT), który charakteryzuje się strukturą warstwową o stosunku 2:1 (2 struktury czworościanu krzemionki obejmujące jedną strukturę ośmiościanu tlenku glinu). Wyróżnia się dwa rodzaje nanoglinek: niemodyfikowane oraz modyfikowane polimerami lub związkami organicznymi.

W przypadku badań asfaltów, osiągnęte wyniki są bardzo zbliżone do pozostałych przedstawionych w artykule nanododatków – w większości badanych przypadków zauważono usztywnienie modyfikowanego lepiszcza [39]–[44]. Dodatek nanoglinek skutkuje obniżeniem penetracji oraz podwyższeniem temperatury mięknięcia [40], [44], a także wzrostem wartości sztywności zarówno w badaniu urządzeniem DSR, jak i BBR. Stwierdzono również obniżenie kąta przesunięcia fazowego oraz obniżenie wartości parametru „m” [39]–[44].

W przypadku mieszanek mineralno-asfaltowych szczególną poprawę właściwości można zauważyć w powinowactwie kruszywa i asfaltu. Praktycznie w każdym przeprowadzonym badaniu zaobserwowano zwiększoną odporność na działanie wody oraz środków odladzających [41], [45]–[49]. Stwierdzono również pewną istotną zależność – w stosunku do próbek referencyjnych dodatek nanoglinki podnosi wytrzymałość na pośrednie rozciąganie próbek kondycjonowanych w wodzie (zestawu „mokrego”), natomiast obniża nieznacznie wytrzymałość próbek kontrolnych (tzw. zestawu „suchego”). Mieszanki mineralno-asfaltowe modyfikowane nanoglinkami charakteryzują się także podwyższoną odpornością na deformacje trwałe [40], [41], [45], [46], [49]–[51] oraz zmęczenie [42], [46].

Pojedyncze próby zostały wykonane także z innymi nanododatkami w postaci nanopłytek – są to na przykład nanopłytki grafitu [52]. Nanododatek tego rodzaju bardzo mocno usztywnia modyfikowane lepiszcze. W temperaturze -18°C zaobserwowano trzykrotne podwyższenie modułu sztywności „S” oraz zmniejszenie o około 35% wartości parametru „m” (4% dodatku). W przypadku badań w wysokiej temperaturze w DSR, wzrost sztywności może być nawet dziesięciokrotny. Ze względu na duże usztywnienie lepiszcza, także w przypadku modułu dynamicznego badanych mieszanek mineralno-asfaltowych, zauważono wzrost wartości. Dodatek nanopłytek grafitu spowodował także poprawę odporności na deformacje trwałe. W przedstawionych badaniach, poza podstawowymi wysokotemperaturowymi właściwościami mieszanek mineralno-asfaltowych, badano także rezystancję. Zauważono, że dodatek 2% nanopłytek grafitu obniża rezystancję o 45%. Jest to szczególnie istotna cecha, jeśli zamierzamy rozważać możliwość transferu energii elektrycznej przez nawierzchnie asfaltowe. W chwili obecnej wykonywane jest to poprzez wbudowane przewody elektryczne lub stalowe zbrojenie rozproszone. Wykorzystanie do tego celu nanododatków pozwoliłoby na uzyskanie dużo bardziej jednorodnego materiału, bez wyraźnych cech nieciągłości, czy też specjalnie przygotowanych procesów technologicznych.

Jak można było zauważyć, większość z przedstawionych nanododatków poprawiła właściwości w średniej i w wysokiej temperaturze – tzn. odporność na działanie wody i mrozu, powstawanie deformacji trwałych, czy właściwości zmęczeniowych. Przy obecnej cenie poszczególnych dodatków efektywność poprawy jest dużo niższa niż w przypadku typowej modyfikacji polimerami, takimi jak np. SBS.

Należy jednak pamiętać, że nanotechnologia w budownictwie drogowym znajduje się dopiero w początkowym etapie prac badawczych i najczęściej stanowi imitację rozwiązań stosowanych już w technologii betonu. Dodatkowo, co można zauważyć w tabelach 1 oraz 2, zestawiających odpowiednio zbadane właściwości lepiszczy oraz mieszanek wykonanych z wykorzystaniem nanododatków, zaled-

Tabela 1. Wpływ dodatku wybranych nanocząstek na podstawowe właściwości asfaltów

Nanocząstka	Badania wg PN-EN			DSR		BBR		Ciągłość
	Penetracja	Temp. mięknięcia	Temp. Fraasa	G*	δ	S	m	
Dwutlenek krzemu SiO ₂	obniża	bez zmian / podnosi	nb	podnosi	bez zmian	bez zmian / podnosi	bez zmian / obniża	nb
Dwutlenek krzemu SiO ₂ (z dodatkiem cr)	obniża	podnosi	nb	podnosi	obniża	podnosi	obniża	obniża
Dwutlenek tytanu TiO ₂	obniża	podnosi	nb	nb	nb	nb	nb	podnosi
Tlenek żelaza(III) Fe ₂ O ₃	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
Tritlenek diglinu Al ₂ O ₃	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
Tlenek cynku ZnO	obniża	podnosi	nb	podnosi	obniża	podnosi	obniża	obniża
Wodorotlenek wapnia Ca(OH) ₂	obniża	podnosi	nb	nb	nb	nb	nb	nb
Nanopoliakrylan	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
Nanorurki / nanowłókna węglowe	nb	nb	nb	podnosi	obniża	podnosi / obniża ^{a)}	obniża	nb
Nanoglinki	obniża	podnosi	nb	podnosi	obniża	podnosi	obniża	nb
Nanopłytki grafitowe	np	nb	nb	podnosi	nb	podnosi	obniża	nb

Uwagi: a) Wyniki zróżnicowane w zależności od składu grupowego asfaltu, w dwóch przypadkach zaobserwowano pogorszenie, w jednym przypadku zaobserwowano poprawienie właściwości, przy czym poprawa właściwości malała wraz z zawartością dodatku.

Tabela 2. Wpływ dodatku wybranych nanocząstek na podstawowe właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych

Nanocząstka	Odporność na działanie wody	Odporność na starzenie	Odporność na deformacje trwałe		Wytrzymałość	Odporność na zmęczenie	Moduł dynamiczny	Inne właściwości
			Koleinowanie	Testy „Flow number”				
Dwutlenek krzemu SiO ₂	podnosi	podnosi	podnosi	podnosi	podnosi	podnosi	podnosi	poprawa „healingu”
Dwutlenek tytanu TiO ₂	podnosi	podnosi	podnosi	nb	nb	podnosi	podnosi	–
Tlenek Żelaza (III) Fe ₂ O ₃	nb	nb	podnosi	nb	nb	podnosi	nb	–
Tritlenek diglinu Al ₂ O ₃	nb	nb	podnosi	nb	nb	podnosi	nb	–
Tlenek Cynku ZnO	podnosi	nb	podnosi	nb	nb	nb	nb	–
Wodorotlenek wapnia Ca(OH) ₂	nb	nb	nb	nb	podnosi	nb	nb	–
Nano poliakrylan	nb	nb	podnosi	nb	nb	nb	nb	–
Nanorurki / nanowłókna węglowe	nb	nb	podnosi	nb	obniża	podnosi	podnosi	–
Nanoglinki	podnosi	nb	podnosi	podnosi	podnosi / obniża ^{a)}	podnosi	podnosi	–
Nanopłytki grafitowe	nb	nb	podnosi	podnosi	nb	nb	podnosi	poprawiają przewodność elektryczną

Uwagi: a) Wyniki zróżnicowane w zależności od sposobu kondycjonowania: w przypadku kondycjonowania w wodzie (zestaw „mokry”) zaobserwowano wzrost wartości, w przypadku próbek kontrolnych (zestaw „suchy”) zaobserwowano spadek wartości.

wie w przypadku pojedynczych nanododatku badania ich właściwości są zaawansowane. W większości zrealizowane zostały pojedyncze próby polegające na ocenie wpływu wybranego nanododatku na pojedynczą właściwość, którą najczęściej jest odporność na deformacje trwałe. W przypadku właściwości niskotemperaturowych, praktycznie brak szczegółowych wyników badań, przez co trudno jest wytyścić odpowiednie nanododatki dla polskiego surowego klimatu [53].

Przy analizie wpływu nanododatku na materiały asfaltowe można podejść jeszcze z innej perspektywy. O ile w chwili obecnej chcemy traktować nanododatki jako elementy poprawiające właściwości materiału, tak jak np. SBS, to w dalszej perspektywie związki te lub też ich bardziej zaawansowane nanostruktury mogą pełnić bardziej skomplikowane funkcje – np. monitorujące, odbierające lub też przekazujące energię elektryczną. Wtedy też będzie możliwe stwierdzenie, że dodatek odpowiednich nanostruktur nie ma negatywnego wpływu na właściwości mechaniczne samych warstw asfaltowych, a także całej konstrukcji nawierzchni.

Perspektywy badawcze

W chwili obecnej, rozwój nanotechnologii w drogownictwie znajduje się na wstępnym etapie. Większość z przytoczonych w artykule badań została wykonana w okresie ostatnich dwóch–trzech lat. Były to głównie badania albo testowanie (metodą „na ślepo”) różnego rodzaju nanododatku, względnie naśladowanie rozwiązań z innych bardziej rozwiniętych pod tym względem gałęzi budownictwa, głównie jednak technologii betonu. W przypadku betonu nanododatki wykorzystywane są od pewnego czasu między innymi do zwiększenia wytrzymałości betonu, przyspieszenia wzrostu jego wytrzymałości [54]–[59], jako zbrojenie rozproszone [35], [60] względnie do naprawy mikrouszkodzeń w betonie [2], [61]. Dość powszechne są powłoki chroniące przed wodą, względnie pochłaniające i rozbijające zanieczyszczenia powietrza [5], [62]. Głównymi efektami stosowania nanododatku w budownictwie drogowym są: podwyższona odporność na powstawanie deformacji trwałych warstw asfaltowych (głównie ze względu na zwiększoną podwyższoną wytrzymałość) oraz poprawa odporności na działanie wody i mrozu. Jednakże, jak wspomniano na wstępie, większość badań przeprowadzona była w krajach o stosunkowo ciepłym i wilgotnym klimacie, takich jak: Iran, Indie, Egipt, Chiny, Malezja, gdzie tego rodzaju cechy są pożądane.

Należy jednak mieć nadzieję, że w najbliższych latach laboratoryjny rozwój nanotechnologii przełoży się także na nauki inżynierskie, np. budownictwo, w których obecnie stosowane są jedynie podstawowe struktury nanometryczne, takie jak wspomniane w artykule cząstki tlenków metali czy nanorurki węglowe. Przykładem zaprojektowanej na miarę nanostruktury materiału są np. inteligentne okna przepuszczające odpowiednie długości fali światła widzialnego [63].

W budownictwie drogowym takimi potencjalnymi zaprojektowanymi zastosowaniami nanostruktur mogą być nawierzchnie odzyskujące oraz magazynujące energię pochodzącą ze słońca, pojazdów czy również zmian temperatury.

Energia taka może potem być wykorzystywana do przeciwdziałania śliskości zimowej lub do indukcyjnego ładowania pojazdów elektrycznych. Obecnie do takich zastosowań stosowane są albo odpowiednio przygotowane przewody albo elementy stalowe, co jednak wpływa na osłabienie właściwości mechanicznych warstw asfaltowych, poprzez nieciągłość struktury. O ile jeszcze kilka lat temu takie rozwiązania byłyby nie do wyobrażenia, obecnie nikogo nie dziwi już zastosowanie paneli słonecznych w konstrukcji nawierzchni [64], [65]. Również potencjalna powierzchnia, na której by można w przyszłości zastosować odpowiednie rozwiązanie jest bardzo duża. Powierzchnia samych tylko dróg krajowych w Polsce wynosi około 140 tys. km², nie wliczając w to powierzchni dróg w miastach i innych zarządców. Kolejnym zastosowaniem może być monitorowanie stanu nawierzchni [66], [67] oraz wspomaganie procesów jej samoleczenia [68], [69].

Można stwierdzić, że potencjalnych zastosowań nanotechnologii jest już wiele. Jednakże obecnie konieczne jest jako pierwsze rozwiązanie nieco prostszych zagadnień, takich jak: kompatybilność nanododatku ze składnikami nawierzchni, stabilność cech materiału przy jego ekspozycji na warunki klimatyczne oraz ruchowe, a także możliwość wielokrotnego wykorzystania środków służących przy odładzaniu czy też samoleczeniu nawierzchni drogowych, aby nie były to bardzo drogie i jednorazowe zastosowania. Innym istotnym zagadnieniem jest odpowiednia aplikacja nanotechnologii, by stanowiło to także rozwiązanie opłacalne ekonomicznie. Dopiero po rozwiązaniu wymienionych problemów będzie można przejść do rozwiązywania bardziej skomplikowanych zagadnień.

Podsumowanie

Obecny stan nanotechnologii w technologii drogowych nawierzchni asfaltowych znajduje się w początkowym stadium badawczym. Od kilku lat trwają intensywne poszukiwania nanododatku, które będzie można wykorzystać przy modyfikacji asfaltów. W większości przeprowadzonych badań laboratoryjnych widoczny jest pozytywny wpływ nanomodyfikacji na poprawę właściwości, szczególnie w przypadku odporności na deformacje trwałe oraz odporności na działanie wody i mrozu. Nie jest to jednak efekt, który uzasadnia wysokie koszty ich stosowania. Należy dodatkowo brać pod uwagę fakt, że jest to cały czas albo naśladowanie dokonań nanotechnologii w innych dziedzinach techniki, albo metoda prób i błędów. Do chwili obecnej ze względu na zbyt skomplikowane, energochłonne i kosztowne techniki nie analizuje się interakcji dodanych nanocząstek z cząstkami znajdującymi się w lepiszczu asfaltowym na poziomie oddziaływań atomowych. Należy w tym zakresie oczekiwać, że wraz z dalszym rozwojem nanotechnologii w budownictwie możliwe będzie wcześniejsze planowanie pożądanych cech lepiszcza, czy też struktur, które będą tworzyły z lepiszczem dodane nanomateriały, tak by można wykorzystać je między innymi do monitoringu oraz samoleczenia nawierzchni, względnie także do pozyskiwania, gromadzenia oraz przekazywania energii.

Bibliografia

- [1] Czarnecki L.: Nanotechnologia w budownictwie. Przegląd Budowlany, 1, 2011, 40–53
- [2] Czarnecki L.: Sustainable Concrete; Is Nanotechnology the Future of Concrete Polymer Composites?. Advanced Materials Research, 687, 2013, 3–11
- [3] Abdullah M. E., Zamhari K. A., Buhari R., Kamaruddin N. H. M., Nayan N., Hainin M. R., Hassan N. A., Jaya R. P., Yusoff N. I. M.: A review on the exploration of nanomaterials application in pavement engineering. Jurnal Teknologi, 73, 4, 2015, 69–76
- [4] Kozubowski J.: Perspektywy nanotechnologii. Wiedza i Życie, 10, 1998,
- [5] Zhu W., Bartos P. J. M., Porro A.: Application of nanotechnology in construction. Materials and Structures, 37, 9, 2004, 649–658
- [6] Sobolev K., Ferrada Gutiérrez M.: How Nanotechnology Can Change Construction Materials. American Ceramic Society Bulletin, 84, 10, 2005, 14–17
- [7] Nurulain C. M., Ramadhansyah P. J., Norhidayah A. H.: A Review of Advance Nanotechnology against Pavement Deterioration. Advanced Materials Research, 1113, 2015, 9–12
- [8] Singh A., Sangita, Singh A.: Overview of nanotechnology in road engineering. Journal of Nano- and Electronic Physics, 7, 2, 2015, 1–6
- [9] Sumesh M., Alengaram U. J., Jumaat M. Z., Mo K. H., Alnahhal M. F.: Incorporation of nano-materials in cement composite and geopolymer based paste and mortar – A review. Construction and Building Materials, 148, 2017, 62–84
- [10] Heinrich P.: Nanotechnologia w budownictwie drogowym. Kongres Innowacji Infrastrukturalnych, 2011
- [11] Sybilski D., Wistuba M. P., Bankowski W., Buchler S., Heinrich P.: Effects of a chemically reactive silane additive on binder-aggregate interaction. ASFALTOVE VOZOVKY 2015 / ASPHALT PAVEMENTS 2015, 2015
- [12] Li R., Xiao F., Amirkhani S., You Z., Huang J.: Developments of nano materials and technologies on asphalt materials – A review. Construction and Building Materials, 143, 2017, 633–648
- [13] Shi X., Cai L., Xu W., Fan J., Wang X.: Effects of nano-silica and rock asphalt on rheological properties of modified bitumen. Construction and Building Materials, 161, 2018, 705–714
- [14] Enieb M., Diab A.: Characteristics of asphalt binder and mixture containing nanosilica. International Journal of Pavement Research and Technology, 10, 2, 2017, 148–157
- [15] Saltan M., Terzi S., Karahancer S.: Examination of hot mix asphalt and binder performance modified with nano silica. Construction and Building Materials, 156, 2017, 976–984
- [16] Han L., Zheng M., Li J., Li Y., Zhu Y., Ma Q.: Effect of nano silica and pretreated rubber on the properties of terminal blend crumb rubber modified asphalt. Construction and Building Materials, 157, 2017, 277–291
- [17] Sadeghnejad M., Shafabakhsh G.: Use of Nano SiO₂ and Nano TiO₂ to improve the mechanical behaviour of stone mastic asphalt mixtures. Construction and Building Materials, 157, 2017, 965–974
- [18] Tanzadeh J., Shahrezagamasaei R.: Laboratory Assessment of Hybrid Fiber and Nano-silica on Reinforced Porous Asphalt Mixtures. Construction and Building Materials, 144, 2017, 260–270
- [19] Amin G. M., Esmail A.: Application of nano silica to improve self-healing of asphalt mixes. Journal of Central South University, 24, 5, 2017, 1019–1026
- [20] Yusoff N. I. M., Breem A. A. S., Alattug H. N. M., Hamim A., Ahmad J.: The effects of moisture susceptibility and ageing conditions on nano-silica/polymer-modified asphalt mixtures. Construction and Building Materials, 72, 2014, 139–147
- [21] Shafabakhsh G. H., Ani O. J.: Experimental investigation of effect of Nano TiO₂/SiO₂ modified bitumen on the rutting and fatigue performance of asphalt mixtures containing steel slag aggregates. Construction and Building Materials, 98, 2015, 692–702
- [22] Granqvist C. G., Azens A., Smulko J., Kish L. B.: Oxide-based electrochromics for energy efficient buildings: materials, technologies, testing, and perspectives. Journal of Physics: Conference Series, 93, 2007, 012021
- [23] Klein M., Szkoda M., Sawczak M., Cenian A., Lisowska-Oleksiak A., Siuzdak K.: Flexible dye-sensitized solar cells based on Ti/TiO₂ nanotubes photoanode and Pt-free and TCO-free counter electrode system. Solid State Ionics, 302, 2017, 192–196
- [24] Hashimoto K., Irie H., Fujishima A.: TiO₂ Photocatalysis: A Historical Overview and Future Prospects. Japanese Journal of Applied Physics, 44, 12, 2005, 8269–8285
- [25] Shafabakhsh G., Mirabdolazimi S. M., Sadeghnejad M.: Evaluation the effect of nano-TiO₂ on the rutting and fatigue behavior of asphalt mixtures. Construction and Building Materials, 54, 2014, 566–571
- [26] Sabura Begum P. M., Mohammed Yusuff K. K., Joseph R.: Preparation and Use of Nano Zinc Oxide in Neoprene Rubber. International Journal of Polymeric Materials, 57, 12, 2008, 1083–1094
- [27] Mishra P. K., Mishra H., Ekielski A., Talegaonkar S., Vaidya B.: Zinc oxide nanoparticles: a promising nanomaterial for biomedical applications. Drug Discovery Today, 22, 12, 2017, 1825–1834
- [28] Hamed G. H., Nejad F. M., Oveisi K.: Estimating the moisture damage of asphalt mixture modified with nano zinc oxide. Materials and Structures/Materiaux et Constructions, 49, 4, 2016, 1165–1174
- [29] Zhang H., Gao Y., Guo G., Zhao B., Yu J.: Effects of ZnO particle size on properties of asphalt and asphalt mixture. Construction and Building Materials, 159, 2018, 578–586
- [30] Kordi Z., Shafabakhsh G.: Evaluating mechanical properties of stone mastic asphalt modified with Nano Fe₂O₃. Construction and Building Materials, 134, 2017, 530–539
- [31] Chelovian A., Shafabakhsh G.: Laboratory evaluation of Nano Al₂O₃ effect on dynamic performance of stone mastic asphalt. International Journal of Pavement Research and Technology, 10, 2, 2017, 131–138
- [32] Khodary F., El-sadek M. S., El-Sheshtawy H. S.: Mechanical Properties of Modified Asphalt Concrete Mixtures Using CA(OH)₂ Nanoparticles. International Journal of Civil Engineering and Technology, 5, 5, 2014, 61–68
- [33] Shaffie E., Ahmad J., Kamarun D.: Rutting Performance of Hot Mix Asphalt Mixture using Nanopolyacrylate Polymer Modifier. Advanced Engineering and Technology, 753, 2015, 194–198
- [34] Sun L., Xin X., Ren J.: Asphalt modification using nano-materials and polymers composite considering high and low temperature performance. Construction and Building Materials, 133, 2017, 358–366
- [35] Kharissova O. V., Torres Martínez L., Kharisov B.: Recent Trends of Reinforcement of Cement with Carbon Nanotubes and Fibers. Advances in Carbon Nanostructures, 2016, 137–160
- [36] Jaskuła P., Stiens M., Szydłowski C.: Effect of Polymer Fibres Reinforcement on Selected Properties of Asphalt Mixtures. Procedia Engineering, 172, 2017, 441–448
- [37] Ziari H., Amini A., Goli A., Mirzaeiyan D.: Predicting rutting performance of carbon nano tube (CNT) asphalt binders using regression models and neural networks. Construction and Building Materials, 160, 2018, 415–426
- [38] Khattak M. J., Khattab A., Rizvi H. R.: Characterization of carbon nano-fiber modified hot mix asphalt mixtures. Construction and Building Materials, 40, 2013, 738–745
- [39] Tsantilis L., Baglieri O., Santagata E.: Low-temperature properties of bituminous nanocomposites for road applications. Construction and Building Materials, 171, 2018, 397–403
- [40] Vargas M. A., Moreno L., Montiel R., Manero O., Vázquez H.: Effects of montmorillonite (Mt) and two different organo-Mt additives on the performance of asphalt. Applied Clay Science, 139, 2017, 20–27
- [41] Golestani B., Nam B. H., Moghadas Nejad F., Fallah S.: Nanoclay application to asphalt concrete: Characterization of polymer and linear nanocomposite-modified asphalt binder and mixture. Construction and Building Materials, 91, 2015, 32–38
- [42] Ashish P. K., Singh D., Bohm S.: Investigation on influence of nanoclay addition on rheological performance of asphalt

- binder. Road Materials and Pavement Design, 18, 5, 2017, 1007–1026
- [43] Yao H., You Z., Li L., Goh S. W., Mills-Beale J., Shi X., Wingard D.: Evaluation of Asphalt Blended With Low Percentage of Carbon Micro-Fiber and Nanoclay. Journal of Testing and Evaluation, 41, 2, 2013, 20120068
- [44] Ezzat H., El-Badawy S., Gabr A., Zaki E. S. I., Breakah T.: Evaluation of Asphalt Binders Modified with Nanoclay and Nanosilica. Procedia Engineering, 143, 2016, 1260–1267
- [45] Iskender E.: Evaluation of mechanical properties of nano-clay modified asphalt mixtures. Measurement, 93, 2016, 359–371
- [46] de Melo J. V. S., Trichês G.: Evaluation of properties and fatigue life estimation of asphalt mixture modified by organophilic nanoclay. Construction and Building Materials, 140, 2017, 364–373
- [47] Goh S. W., Akin M., You Z., Shi X.: Effect of deicing solutions on the tensile strength of micro- or nano-modified asphalt mixture. Construction and Building Materials, 25, 1, 2011, 195–200
- [48] Abandansari H. F., Modarres A.: Investigating effects of using nanomaterial on moisture susceptibility of hot-mix asphalt using mechanical and thermodynamic methods. Construction and Building Materials, 131, 2017, 667–675
- [49] Abdullah M. E., Zamhari K. A., Hainin M. R., Oluwasola E. A., Nur N. I., Hassan N. A.: High temperature characteristics of warm mix asphalt mixtures with nanoclay and chemical warm mix asphalt modified binders. Journal of Cleaner Production, 122, 2016, 326–334
- [50] Ameri M., Mohammadi R., Vamegh M., Molayem M.: Evaluation the effects of nanoclay on permanent deformation behavior of stone mastic asphalt mixtures. Construction and Building Materials, 156, 2017, 107–113
- [51] Yao H., You Z.: Effectiveness of Micro-and Nanomaterials in Asphalt Mixtures through Dynamic Modulus and Rutting Tests. Journal of Nanomaterials, 2016, 2645250
- [52] Wang Z., Dai Q., Guo S.: Laboratory performance evaluation of both flake graphite and exfoliated graphite nanoplatelet modified asphalt composites. Construction and Building Materials, 149, 2017, 515–524
- [53] Pszczoła M., Ryś D., Jaskuła P.: Analiza stref klimatycznych w polsce z uwzględnieniem klasyfikacji funkcjonalnej asfaltów performance grade. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, 16, 4, 2017, 245–264
- [54] Shah S. P., Hou P., Konsta-Gdoutos M. S.: Nano-modification of cementitious material: toward a stronger and durable concrete. Journal of Sustainable Cement-Based Materials, 5, 1–2, 2016, 1–22
- [55] Saloma, Nasution A., Imran I., Abdullah M.: Improvement of concrete durability by nanomaterials. Procedia Engineering, 125, 2015, 608–612
- [56] Sobolev K., Flores I., Hermosillo R., Torres-Martinez L. M.: Nanomaterials and Nanotechnology for High-Performance Cement Composites. *Nanotechnology of Concrete: Recent Developments and Future Perspectives*, 2008, 93–120
- [57] Meng W., Khayat K. H.: Mechanical properties of ultra-high-performance concrete enhanced with graphite nanoplatelets and carbon nanofibers. Composites Part B: Engineering, 107, 2016, 113–122
- [58] Dębińska E.: Wpływ nanokrzemionki na parametry mechaniczne kamienia cementowego. Nafta-Gaz, LXX, 4, 2014, 229–235
- [59] Wu Z., Shi C., Khayat K. H., Wan S.: Effects of different nanomaterials on hardening and performance of ultra-high strength concrete (UHSC). Cement and Concrete Composites, 70, 2016, 24–34
- [60] Vera-Agullo J., Chozas-Ligero V., Portillo-Rico D., García-Casas M. J., Gutiérrez-Martínez A., Mieres-Royo J. M., Grávalos-Moreno J.: Mortar and Concrete Reinforced with Nanomaterials. *Nanotechnology in Construction 3*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009, 383–388
- [61] Łukowski P., Adamczewski G.: Self-repairing of polymer-cement concrete. Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences, 61, 1, 2013,
- [62] Jones W., Gibb A., Goodier C., Bust P., Song M., Jin J.: Nanomaterials in construction – what is being used, and where? Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials, 2016, 1–14
- [63] Huang H., Ng M., Wu Y., Kong L.: Solvothermal synthesis of Sb:SnO₂ nanoparticles and IR shielding coating for smart window. Materials & Design, 88, 2015, 384–389
- [64] Duarte F., Casimiro F., Correia D., Mendes R., Ferreira A.: A new pavement energy harvest system. 2013 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), 2013, 408–413
- [65] Dezfooli A. S., Nejad F. M., Zakeri H., Kazemifard S.: Solar pavement: A new emerging technology. Solar Energy, 149, 2017, 272–284
- [66] Liu X., Wu S., Ye Q., Qiu J., Li B.: Properties evaluation of asphalt-based composites with graphite and mine powders. Construction and Building Materials, 22, 3, 2008, 121–126
- [67] Liu X., Wu S.: Study on the graphite and carbon fiber modified asphalt concrete. Construction and Building Materials, 25, 4, 2011, 1807–1811
- [68] García A., Bueno M., Norambuena-Contreras J., Partl M. N.: Induction healing of dense asphalt concrete. Construction and Building Materials, 49, 2013, 1–7
- [69] Liu Q., Schlangen E., van de Ven M.: Induction Healing of Porous Asphalt. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2305, 2012, 95–101

Zapraszamy do prenumerowania DROGOWNICTWA w 2019 roku

prenumerata roczna normalna 250 zł } (w tym 5% VAT)
cena 1 egzemplarza 21 zł }

prenumerata roczna studencka 125 zł } (w tym 5% VAT)
cena 1 egzemplarza 10,50 zł }

Uprzejmie informujemy Szanownych Prenumeratorów, że egzemplarze „Drogownictwa” oraz faktury będą wysyłane po przesłaniu zamówienia na adres prenumerata.drogownictwo@sitkrp.org.pl oraz po wpłaceniu należnej kwoty na nasze konto:

38 1160 2202 0000 0000 2741 3872

Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Komunikacji RP, Zarząd Krajowy
ul. Czackiego 3/5, 00-043 Warszawa

Redakcja