



AGNIESZKA ŻURAWICKA¹⁾

CIENKIE WARSTWY BETONOWE WZMACNIAJĄCE NAWIERZCHNIE DROGOWE

Cz. I

STRESZCZENIE. Artykuł przedstawia jedną z technologii stosowanych obecnie na świecie podczas modernizacji dróg - wzmocnienie istniejącej nawierzchni drogowej nakładką z betonu cementowego związaną z podbudową.

W pierwszej części artykułu, na podstawie wybranych światowych zastosowań nakładek betonowych podsumowano doświadczenia z ich stosowania. Omówiono czynniki wpływające na właściwości nakładek oraz przedstawiono zalecenia do projektowania i wykonania cienkich nakładek betonowych na istniejących nawierzchniach betonowych i asfaltowych.

W następnej części artykułu przedstawione zostaną wyniki badań w skali naturalnej płyt betonowych wzmocnianych cienkimi nakładkami.

1. WSTĘP

Modernizacja drogi ma na celu poprawienie warunków ruchu drogowego, zwłaszcza jego bezpieczeństwa i komfortu przy jednoczesnym zwiększeniu nośności i dopuszczalnej szybkości na całej długości drogi. Jedną z metod wzmocnienia jest ułożenie

¹⁾ mgr inż. – Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Filia Wrocław

nowej warstwy na istniejącej nawierzchni, co pozwala na odnowienie własności powierzchniowych jezdni, jak również wzmocnienie całej konstrukcji nawierzchni. Odpowiednio zaprojektowana i wykonana warstwa naprawcza może znacząco wydłużyć okres eksploatacji istniejącej nawierzchni [1].

Obecnie najczęściej stosowane są następujące typy wzmocnień warstwowych:

- ułożenie na istniejącej nawierzchni betonowej lub asfaltowej warstwy betonu cementowego (nakładki betonowej) o grubości od 50 do 250 mm, modyfikowanego polimerami, zawierającego różne domieszki i dodatki jak np. mikrokrzemionkę (pył krzemionkowy), popioły lotne; warstwa ta może być nieuzbrojona lub ze zbrojeniem w postaci prętów, siatek,
- ułożenie na istniejącej nawierzchni betonowej lub asfaltowej warstwy z mieszanki mineralno - bitumicznej,
- recykling na drodze na zimno i na gorąco - kruszenie płyty starej nawierzchni betonowej lub asfaltowej i ułożenie nowej warstwy z wykorzystaniem odzyskanych materiałów.

Stosowane są dwa rodzaje rozwiązania konstrukcyjnego połączenia starej nawierzchni z nową warstwą:

- warstwa związana z podbudową - w tym przypadku nowa warstwa układana jest bezpośrednio na istniejącej nawierzchni lub za pośrednictwem warstwy szepnej na bazie cementu lub żywic syntetycznych, której rola polega na poprawie przyczepności międzywarstwowej, analogiczną rolę pełnią także łączniki mechaniczne - kotwy przenoszące siły ścinające pojawiające się w styku warstw,
- warstwa niezwiązana z podbudową - na istniejącej nawierzchni układana jest warstwa poślizgowa, a następnie na nią nowa warstwa.

Artykuł przedstawia jedną z technologii stosowanych obecnie na świecie podczas modernizacji dróg - wzmacnianie istniejącej nawierzchni nakładką z betonu cementowego związaną z podbudową. W części 2 artykułu przedstawione zostaną wyniki badań przeprowadzonych w Instytucie Badawczym Dróg i Mostów - Filia Wrocław wspólnie z Instytutem Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk oraz przy współpracy z Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (Université Paul Sabatier/INSA, Toulouse) dotyczące badań w skali naturalnej drogowych płyt betonowych wzmacnianych cienkimi nakładkami betonowymi.

2. NAKŁADKI BETONOWE NA ISTNIEJĄCYCH NAWIERZCHNIACH BETONOWYCH

2.1. NAKŁADKI BETONOWE

Układanie nowych warstw betonowych jest jedną z powszechniejszych metod odnowy zniszczonych nawierzchni betonowych. Warstwa nawierzchniowa pozwala na

przedłużenie użytkowania konstrukcji. Podstawowym założeniem tej technologii jest uzyskanie przyczepności warstwy nawierzchniowej do istniejącego podłoża.

Podstawowe założenia technologiczne stosowania nakładki betonowej (ang. *bonded concrete overlay*) przedstawiono w [2]:

- grubość nakładki betonowej: od 50 do 250 mm, cienkie nakładki betonowe: od 50 do 100 mm,
- czyste podłoże betonowe (bez pozostałości ewentualnych warstw asfaltowych),
- dobry stan nawierzchni do stworzenia monolitycznego połączenia.

Nakładki betonowe są projektowane i wykonywane tak jak klasyczne nawierzchnie betonowe. Celem stosowania nakładek betonowych [3] jest zwiększenie grubości nawierzchni i jej sztywności, redukcja naprężeń rozciągających w nawierzchni, wzrost trwałości zmęczeniowej. Przyjmuje się, że nakładka betonowa jest doskonale przyczepna do istniejącej nawierzchni, tworząc konstrukcję monolityczną. Bez przyczepności nie ma korzyści z zastosowania nakładki. Co więcej, bez przyczepności warstwa naprawcza może się ślizgać względem podłoża betonowego i może podlegać naprężeniom zginającym, które mogą prowadzić do wczesnego zarysowania i zniszczenia konstrukcji warstwowej. Naprężenia rozwarstwiające w styku pojawiają się w momencie obciążenia ruchem nieprawidłowo wykonanej nakładki betonowej z powodu różnej rozszerzalności istniejącej nawierzchni i nakładki betonowej lub też w momencie wystąpienia skurczu nakładki betonowej.

Zaprojektowana konstrukcja warstwowa (warstwa naprawcza - podłoże) powinna funkcjonować w sposób monolityczny, wzajemny styk powierzchni powinien zapewniać ciągłość przenoszenia obciążeń między warstwą wzmacniającą a podłożem, szczególnie istotne jest to w przypadku stosowania cienkich nakładek betonowych. Autorzy wcześniejszych prac badawczych przeprowadzonych między innymi w Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions I.N.S.A. - U.P.S. [4 - 6] wykazali, że trwałość połączenia pomiędzy cienką nakładką betonową a podłożem zależy od rodzaju i grubości warstwy wzmacniającej. Obszar krytyczny naprawy nie jest zlokalizowany pod przyłożonym obciążeniem, ale w pewnym oddaleniu od niego, w przekroju ekstremalnego momentu ujemnego. W przekrojach tych, pojawienie się i rozszerzenie się rysy powoduje przerwanie ciągłości warstwy naprawczej, a naprężenia rozciągające i ścinające pojawiają się na styku warstw i rozpoczyna się proces odspajania nakładki od istniejącego podłoża. Tak więc wybór rodzaju materiału warunkuje efektywność wykonanego wzmocnienia nawierzchni. Wśród rozwiązań materiałowych do cienkowarstwowych napraw i wzmacniania płyt betonowych stosowane były między innymi fibrobetony z włóknami metalowymi.

2.2. WYBRANE DOŚWIADCZENIA ŚWIATOWE W STOSOWANIU NAKŁADEK BETONOWYCH NA ISTNIEJĄCYCH NAWIERZCHNIACH BETONOWYCH

Pierwsze zastosowania nakładek betonowych pojawiły się około roku 1913 w Stanach Zjednoczonych, od 1965 roku rozpoczęły się intensywne badania i rozwój tej technologii.

IH-80 koło Truckee, California, USA, 1981 [7, 8]

Na istniejącej nawierzchni z 1964 r. o grubości 200 mm wykonano nakładkę betonową na odcinku 2,4 km o charakterystyce przedstawionej w tablicy 1.

Tablica 1. Charakterystyka nakładki betonowej
Table 1. Characteristics of thin concrete overlays

Stan istniejącej nawierzchni	uszkodzona
Rodzaj ruchu	ciężki
Przygotowanie podłoża	piaskowanie
Warstwa szepna	zaczyn cementowy
Grubość nakładki betonowej	75 mm
Rodzaj i zawartość włókien	brak

Podczas prac pojawiły się problemy z wykonaniem nakładki; stwierdzono wodożądne kruszywo, co miało wpływ na konsystencję mieszanki, wysoką temperaturę podczas wykonywania nakładki, niską wilgotność powietrza, duży wiatr. Efektem były poprzeczne rysy w narożnikach, cienkie, ale liczne w odstępach co 30 cm. Po dwóch miesiącach na wszystkich pasach stwierdzono delaminację. Po przeanalizowaniu powyższych problemów stwierdzono, że przyczyny uszkodzeń są następujące:

- wyschnięcie zaczynu (warstwy szepnej) przed nałożeniem nakładki,
- słabe przygotowanie podłoża,
- niedostateczna pielęgnacja,
- odparowanie wody z mieszanki,
- duża różnica temperatur między mieszanką a istniejącą nawierzchnią,
- wczesny duży skurcz,
- wodożądne kruszywo.

Podczas dalszego ciągu prac przy wykonywaniu nakładek betonowych zmieniono procedurę wykonania. Kruszywa do mieszanki betonowej były mokre, a istniejącą nawierzchnię uszorstniono.

IH-610, South Loop, Houston, USA, 1983 [7, 9]

Na 4-pasmowej autostradzie z 1970 r. na istniejącej nawierzchni o grubości 200 mm wykonano 305 metrowy odcinek próbny o charakterystyce przedstawionej w tablicy 2.

Tablica 2. Charakterystyka nakładki betonowej
Table 2. Characteristics of thin concrete overlays

Stan istniejącej nawierzchni	uszkodzona
Rodzaj ruchu	bardzo ciężki
Przygotowanie podłoża	frezowanie na głębokość 6 cm, piaskowanie i przedmuchanie sprężonym powietrzem
Warstwa szczepna	bez warstwy szczepnej i z warstwą szczepną z zaczynu cementowego o $w/c=0,62$ z superplastyfikatorem
Grubość i rodzaj nakładki betonowej	- 50 mm z betonu niezbrojonego, - 50 mm i 75 mm z betonu zbrojonego, - 50 mm i 75 mm z fibrobetonu
Rodzaj włókien	Dramix ZP 50/50
Pielęgnacja	materiałem zawierającym biały pigment

Po oględzinach oddanej do ruchu nawierzchni stwierdzono pojawienie się drobnych, włoskowatych zarysowań "odbitych" ze starej nawierzchni. Więcej rys wzdłuż podłużnych szczelin zaobserwowano na odcinkach betonu zbrojonego siatkami niż na odcinkach wykonanych z fibrobetonu. Część odcinków wykonano bez warstwy szczepnej i nie stwierdzono niekorzystnych efektów. Kolejne oględziny wykonano po trzech latach eksploatacji i nie stwierdzono rozwarstwiania się nakładki betonowej i istniejącej nawierzchni. Stwierdzono, że zastosowanie włókien stalowych pozwoliło na lepsze kontrolowanie zarysowań. W latach 1987-1988 wykonano szczegółowe badania wykonanych odcinków pod kątem delaminacji - nie stwierdzono rozwarstwiania nawierzchni.

Doświadczenia belgijskie, 1983 [10]

Charakterystykę zastosowań nakładek betonowych w Belgii przedstawiono w tablicy 3.

W 1992 roku dokonano oględzin wykonanych nakładek. Stwierdzono uszkodzenia w obrębie szczelin spowodowane brakiem przyczepności nakładek do istniejącej nawierzchni. W miejscach, w których przyczepność była zachowana, nie stwierdzono wpływu włókien stalowych na właściwości nakładki.

Tablica 3 Charakterystyka nakładek betonowych
Table 3. Characteristics of thin concrete overlays

Miejsce stosowania	Gent	Vierset
Data wykonania	1983	1983
Stan istniejącej nawierzchni	uszkodzona	koleiny
Rodzaj ruchu	ciężki	lekki
Przygotowanie podłoża i warstwa szczipna	<ul style="list-style-type: none"> - oczyszczenie, - oczyszczanie i zastosowanie cementowej warstwy szczipnej, - frezowanie, - frezowanie i zastosowanie cementowej warstwy szczipnej 	
Grubość nakładki	100 mm	100 mm
Rodzaj i zawartość włókien	Dramix 50/50 40 kg/m ³	Dramix 50/50 40 kg/m ³
Szczeliny	zgodnie z układem w istniejącej nawierzchni	

Autostradowa obwodnica Mori, Japonia, 1984 [7, 11]

Na istniejącej nawierzchni z 1972 r. o grubości 230 mm i długości 1,6 km, niezbrojonej, ze szczelinami oraz na 1 km ciągłej zbrojonej nawierzchni o grubości 200 mm wykonano nakładkę betonową o charakterystyce przedstawionej w tablicy 4.

Tablica 4. Charakterystyka nakładki betonowej
Table 4. Characteristics of thin concrete overlays

Stan istniejącej nawierzchni	mocno uszkodzona
Rodzaj ruchu	ciężki
Przygotowanie podłoża	usunięcie 3 cm starej nawierzchni, śrutowanie
Warstwa szczipna	cementowa, epoksydowa, beton polimerowy
Grubość i rodzaj nakładki	50, 60 i 80 mm beton niezbrojony i fibrobeton
Rodzaj i zawartość włókien	stalowe, 100 kg/m ³
Szczeliny	zgodnie z układem w istniejącej nawierzchni

Przeprowadzone badania kontrolne wykazały, że jedną z najlepszych przyczepności nakładki betonowej uzyskano przy ułożeniu jej bezpośrednio na oczyszczone przez śrutowanie podłoże (inne badane przypadki to: warstwy szepne cementowa i epoksydowa, śrutowanie i warstwa szepna, warstwa szepna z betonu polimerowego).

Po oględzinach nawierzchni stwierdzono, że zarysowania w fibrobetonie stanowią około 10 % zarysowań stwierdzonych w przypadku nakładki z betonu bez włókien, ich rozwarłość jest niewielka (około 0,6 mm) i nie obniżają właściwości użytkowych nawierzchni. Ponadto stwierdzono mniej rys "odbitych" na nakładce nałożonej na nawierzchnię ciągłą.

IH-610, North Loop, Houston, USA, 1985-1986 [7, 12]

Na starej (z 1965 r.) nawierzchni ciągłej zbrojonej o grubości 200 mm na odcinku 5,1 km wykonano nakładkę betonową o charakterystyce przedstawionej w tablicy 5.

Tablica 5 Charakterystyka nakładki betonowej
Table 5. Characteristics of thin concrete overlays

Stan istniejącej nawierzchni	uszkodzona
Rodzaj ruchu	ciężki
Przygotowanie podłoża	piaskowanie, przedmuchiwanie sprężonym powietrzem
Warstwa szepna	zaczyn cementowy
Grubość i rodzaj nakładki	100 mm beton zbrojony siatkami zgrzewanymi i fibrobeton
Rodzaj i zawartość włókien	stalowe, 50 kg/m ³
Uwagi	do mieszanek betonowych zastosowano różne kruszywa: żwir rzeczny i kamień wapienny

Po 2 latach eksploatacji zaobserwowano delaminację na odcinkach zbrojonych prętami. Nakładki z betonu z kruszywem wapiennym i siatką zbrojeniową, a także ze żwirem, miały mniej rozwarstwień niż nakładka z betonu ze żwirem i siatkami zbrojowymi. Stwierdzono, że rozwarstwianie było skorelowane z większym parowaniem. Delaminacja pojawiała się, kiedy różnica temperatur między dniem układania mieszanki a kolejnym dniem była większa od 14 °C. Zastosowanie zaczynu cementowego jako warstwy szepnej dało większą wytrzymałość styku niż dla odcinków bez warstwy szepnej. Nie stwierdzono postępu delaminacji, z wyłączeniem sekcji bez warstwy szepnej. Rozwarstwianie często stwierdzano po 24 godz. od wykonania

nakładki. We wszystkich przypadkach stwierdzono delaminację zlokalizowaną obok szczeliny lub zarysowania. Rozwarstwianie nie postępowało z upływem czasu eksploatacji w ciągu 3 lat obserwacji.

Analiza zarysowań pokazała, że nie zawsze były to zarysowania "odbite", nawierzchnia z betonu ze żwirem rzeczonym miała więcej zarysowań niż ta z łamanym kruszywem wapiennym. Pomiedzy przeglądami zarysowania poprzeczne zwiększały się w obszarach występowania delaminacji, ale nie zwiększały się w obszarach bez delaminacji. Analizując zastosowania na Loop IH-610 stwierdzono, że rodzaj zbrojenia, grubość, rodzaj kruszywa są ważne z uwagi na pojawianie się i rozwój rys poprzecznych w nakładce betonowej. Rozwarstwianie pojawia się przy niskich naprężeniach (poniżej 350 kPa) podczas gdy nakładka jest we wczesnej fazie pielęgnacji. Połączenie jest lepsze, gdy nakładka jest dobrze pielęgnowana. Wczesne rozwarstwianie pojawia się tylko wtedy, gdy wpływy zewnętrzne powodują znaczącą kumulację naprężeń w styku warstw wkrótce po ułożeniu betonu. Delaminacja pojawiała się też wtedy, gdy podczas układania betonu nakładki warstwa szcpejna była sucha, działała wtedy jak warstwa poślizgowa. W latach 1987-1988 wykonano kolejne szczegółowe badania nawierzchni pod kątem delaminacji. Stwierdzono największą delaminację na odcinkach z betonu ze żwirem rzeczonym i zbrojonych siatkami z warstwą szcpepną - w jednej z sekcji nawet 1/4 powierzchni była oddzielona. Na odcinkach z betonu z kruszywem wapiennym nie zauważono delaminacji w 1987 r. i niewielką w 1988 r., natomiast odcinki z fibrobetonu wykazywały bardzo dobre właściwości. Na podstawie obserwacji 4 sekcji bez warstwy szcpepnej stwierdzono występowanie delaminacji na obszarze 2,8 % w 1987 r. i 3,1 % w 1988 r.

West Montreal, Kanada, 1986 [7, 13]

W 1986 r. wykonano około 18 różnych wzmocnień konstrukcji nawierzchnii, zastosowano 3 typy włókien. W starej nawierzchni w celu poprawy przyczepności miejscami osadzano kotwy o długości 38 mm.

Przygotowanie podłoża odbywało się przez śrutowanie i zrywanie przy pomocy piły diamentowej. Warstwę szcpepną z zaczynu cementowego wykonano na jednym pasmie, a na 2 pasmach zastosowano stalowe kotwy.

Po zakończeniu realizacji stwierdzono, że właściwości płyt z niezbrojonego betonu są słabe, chociaż na odcinkach z kotwami mechanicznymi przyczepność była zapewniona. Odcinki z fibrobetonu miały znacznie mniej zarysowań. Na tych odcinkach wpływ kotew był mniej ewidentny. Po 8 miesiącach eksploatacji rysy w nakładce z fibrobetonu się ustabilizowały, choć nadal propagowały w betonie niezbrojonym. Warstwy niezbrojone wykazywały duże uszkodzenia, takie jak zarysowania i delaminacja; zostały wymienione po 18 miesiącach od naprawy.

Autostrada nr 40, Montreal, Kanada, 1986 [13]

Autostrada 6-pasmowa obciążona przejazdami 3000 pojazdów na dzień była naprawiana w 1986 roku przy zastosowaniu technologii cienkiej warstwy betonowej. Zostały zastosowane różne rodzaje warstw naprawczych:

- beton zwykły,
- fibrobeton z włóknami stalowymi w ilości od 22 do 34 kg/m³.

Obszary wzmocnione betonem bez włókien uległy zniszczeniu bardzo szybko; stwierdzono zarysowania prowadzące do dzielenia i rozwarstwiania warstwy naprawczej lub do rozwarstwiania i dzielenia warstwy naprawczej. Po 2 latach od wykonania naprawy odcinki te były zniszczone. Warstwy z fibrobetonu po latach użytkowania były w dobrym stanie, z drobnymi zarysowaniami mieszczącymi się w granicach normy bez oznak rozwarstwiania. Mimo że wzmocnienie włóknami nie zapobiegło pojawianiu się i rozwieraniu się zarysowań "odbitych" ze starej nawierzchni, to skutecznie ograniczyło rozwój innych zarysowań. Stwierdzone na nakładce betonowej rysy były cienkie, w ograniczonej liczbie, w większości sięgały na głębokość do połowy warstwy naprawczej.

I-10 South of Baton Rouge, Louisiana, USA, 1990 [14]

Na istniejącej nawierzchni ciągłej, zbrojonej, o grubości 203 mm, po 16 latach eksploatacji, na odcinku 8,4 km, na drodze o 22 % udziale ruchu ciężkiego dziennie, wykonano cienką nakładkę betonową o charakterystyce przedstawionej w tablicy 6.

Tablica 6 Charakterystyka nakładki betonowej
Table 6. Characteristics of thin concrete overlays

Stan istniejącej nawierzchni	uszkodzona
Rodzaj ruchu	ciężki
Przygotowanie podłoża	śrutowanie
Warstwa szczipna	zaczyn cementowy
Grubość i rodzaj nakładki	101 mm fibrobeton
Rodzaj i zawartość włókien	stalowe, 50 kg/m ³

Po 3 miesiącach od wykonania pojawiły się pierwsze zarysowania "odbite", po roku było 32 % zarysowań poprzecznych "odbitych", ale niezbyt szerokich i nie zagrażających użyteczności drogi, natomiast po 3 latach tylko 35 %. Szczegółowe oględzin wykazały, że większość rys ukazywała się do 6 miesięcy od wykonania nawierzchni, a potem tylko pojedyncze.

Ogólnie stwierdzono bardzo dobrą przyczepność, w dwóch miejscach, w sąsiedztwie szczelin zauważono rozwarstwienia o niewielkim zasięgu. Prawdopodobną przyczyną tych delaminacji były problemy z wykonaniem nakładki. Ponadto stwierdzono dwie krótkie rysy wzdłużne "odbite", ale o małej rozwarstości i bez wpływu na eksploatację.

Autostrada E4 niedaleko Helsingborg, Szwecja, 1991 [15]

Na odcinku 7 km wybudowanej w 1978 r. nawierzchni o grubości 200 mm, ze szczelinami poprzecznymi co 5 m oraz szczelinami wzdłużnymi między pasami ruchu wykonano nakładkę betonową o długości 470 m i szerokości 3 m, zagłębioną w istniejącej nawierzchni o charakterystyce przedstawionej w tablicy 7.

Tablica 7. Charakterystyka nakładki betonowej
Table 7. Characteristics of thin concrete overlays

Stan istniejącej nawierzchni	uszkodzona
Rodzaj ruchu	ciężki
Przygotowanie podłoża	oczyszczenie wodą pod ciśnieniem, osuszenie
Warstwa szepna	brak
Grubość i rodzaj nakładki	35 mm fibrobeton
Rodzaj i zawartość włókien	Dramix 30/50 40 kg/m ³
Szczeliny	szerokości 3 mm i głębokości 30 mm nad szczelinami w istniejącej nawierzchni, wypełniane

Na podstawie zastosowania stwierdzono:

- szorstkość strefy kontaktu gra główną rolę w uzyskaniu dobrej przyczepności,
- czystość powierzchni i brak mikrorys są równie istotne, co ma wpływ na dobór metody przygotowania powierzchni,
- stosowanie warstw szepnych nie jest konieczne,
- włókna stalowe pomagają kontrolować zarysowania (pojawiają się tylko cienkie rysy).

Podczas badań nawierzchni stwierdzono dobrą przyczepność nakładki do istniejącej nawierzchni.

Autostrada I-80 niedaleko Moline, Illinois, USA, 1994-1995 [16]

Na odcinku autostrady I-80 niedaleko Moline nakładkę betonową wykonano w latach 1994-1995 na starej nawierzchni betonowej o grubości 203 mm, ciągłej, zbrojonej, zbudowanej w 1965 r. Zaprojektowano nakładkę betonową o grubości 102 mm z betonu bez zbrojenia. Wykonano 6 eksperymentalnych odcinków na obu pasach. Typowy beton był modyfikowany różną zawartością mikrokrzemionki oraz stosowane były różne warstwy szepne.

Na obu pasach wykonano odcinki stosując następujące warianty materiałowe:

- beton bez mikrokrzemionki, bez warstwy szepnej,
- beton bez mikrokrzemionki, warstwa szepna z zaczynu cementowego zawierającego mikrokrzemionkę,
- beton z dodatkiem 3 % mikrokrzemionki, bez warstwy szepnej,
- beton z dodatkiem 3 % mikrokrzemionki, warstwa szepna z zaczynu cementowego zawierającego mikrokrzemionkę,
- beton z dodatkiem 5 % mikrokrzemionki, bez warstwy szepnej,
- beton z dodatkiem 5 % mikrokrzemionki, warstwa szepna z zaczynu cementowego zawierającego mikrokrzemionkę.

Wkrótce po oddaniu nawierzchni do ruchu pojawiło się wiele poprzecznych zarysowań. Na jednym z odcinków (z betonu bez mikrokrzemionki i bez warstwy szepnej) stwierdzono też podłużne zarysowania. Stwierdzono jednak, że w tym samym miejscu były też zarysowania podłużne nawierzchni wzmacnianej. Zaobserwowane zarysowania były prawdopodobnie "odbite" od starej nawierzchni.

Odcinki z betonu zawierającego mikrokrzemionkę miały więcej poprzecznych zarysowań, podczas gdy odcinki z betonu bez mikrokrzemionki tylko kilka. Na odcinkach z mikrokrzemionką zarysowania te pojawiły się wcześniej. Odcinki bez warstwy szepnej miały więcej zarysowań. Badania przyczepności nakładek betonowych na wszystkich odcinkach wykazały dobrą przyczepność. Nie stwierdzono, aby zastosowanie zaczynu cementowego jako warstwy szepnej poprawiło przyczepność nakładki.

Autostrada I-295 koło Richmond oraz I-85 koło Petersburg, Virginia, USA, 1995 [17]

Na istniejących ciągłych zbrojonych nawierzchniach wykonano w 1995 r. nakładki betonowe o charakterystyce przedstawionej w tablicy 8.

Tablica 8. Charakterystyka nakładki betonowej
Table 8. Characteristics of thin concrete overlays

Miejsce stosowania	I-295	I-85
Stan istniejącej nawierzchni	uszkodzona	uszkodzona
Rodzaj ruchu	ciężki	ciężki
Przygotowanie podłoża	śrutowanie z usunięciem 3 mm istniejącej nawierzchni, nawilżenie podłoża przed ułożeniem nakładki	
Grubość i rodzaj nakładki	51 mm beton oraz fibrobeton	102 mm beton oraz fibrobeton
Rodzaj i zawartość włókien	- poliolefinowe dł. 25 mm 11,9 kg/m ³ i 14,8 kg/m ³ , - fibrylowane polipropylenowe dł. 19 mm 1,8 kg/m ³ , - stalowe 30×0,5 mm 29,7 kg/m ³ i 44,5 kg/m ³	- polipropylenowe 0,9 kg/m ³ i 3,0 kg/m ³ , - stalowe 30×0,5 mm 29,7 kg/m ³ i 44,5 kg/m ³

W roku 1999 przeprowadzono badania wykonanych nakładek betonowych. Zauważono ograniczoną ilość poprzecznych zarysowań o niewielkiej szerokości (0,25-0,65 mm). Stwierdzono, że zarysowania te są "odbite" ze starej nawierzchni. Mniej zarysowań stwierdzono na nawierzchni z fibrobetonu; w najlepszym stanie była nawierzchnia z fibrobetonu z włóknami stalowymi w ilości 44,5 kg/m³. Nie zauważono występowania rozwarstwień. Przyczepność badano na odwiertach. W przypadku nawierzchni na autostradzie I-295 stwierdzono bardzo dobrą przyczepność z wyjątkiem odcinka z włóknami poliolefinowymi. Na autostradzie I-85 stwierdzono bardzo dobrą przyczepność na wszystkich odcinkach.

Autostrada I-88 niedaleko Moline, Illinois, USA, 1996 [16]

Odcinek na autostradzie I-88 koło Moline zrealizowano w 1996 r. Stara nawierzchnia betonowa o grubości 203 mm, ciągła, zbrojona, zbudowana w 1975 r. została wzmocniona nakładką betonową o charakterystyce przedstawionej w tablicy 9.

Podczas oględzin kilka lat po oddaniu do użytkowania stwierdzono, że nawierzchnia jest w dobrym stanie.

Tablica 9. Charakterystyka nakładki betonowej
Table 9. Characteristics of thin concrete overlays

Stan istniejącej nawierzchni	uszkodzona
Rodzaj ruchu	ciężki
Przygotowanie podłoża	- frezowanie na zimno z lekkim śrutowaniem, - śrutowanie
Warstwa szepna	brak
Grubość i rodzaj nakładki	76 mm beton bez zbrojenia

3. NAKŁADKI BETONOWE NA ISTNIEJĄCYCH NAWIERZCHNIACH ASFALTOWYCH

3.1. NAKŁADKA BETONOWA NA NAWIERZCHNI ASFALTOWEJ (*WHITETOPPING*) [18-20]

Wyeksploatowane nawierzchnie asfaltowe mogą być odnawiane poprzez wykonanie nakładki betonowej przy zastosowaniu dwóch technologii: *whitetopping* oraz *ultra-thin whitetopping*.

Zapożyczony z języka angielskiego termin *whitetopping* przyjął się w polskim piśmiennictwie technicznym na określenie nakładki betonowej na nawierzchni asfaltowej w postaci płyty o grubości 100 mm lub więcej, położonej bezpośrednio istniejącej nawierzchni asfaltowej. Sztywne płyty betonowe rozkładają obciążenia na dużej powierzchni podłoża, dlatego koncentracja naprężeń w podłożu jest mniejsza.

Pierwszą taką nakładkę wykonano już w 1918 r. na ulicy South 7th Street in Terre Haute, w stanie Indiana. Ale dopiero w połowie lat siedemdziesiątych nastąpił rozwój tej technologii na większą skalę. W latach sześćdziesiątych wykonano takie wzmocnienia na drogach w stanach Kalifornia, Iowa, Utah. Grubości płyt wynosiły od 175 do 225 mm. Płyty były dzielone skośnymi szczelinami poprzecznymi niedyblowanymi, w rozstawie 4,0 - 5,8 - 5,5 - 3,7 m. Nawierzchnie te po 20 latach eksploatacji były w dobrym stanie. Liczba udokumentowanych nakładek betonowych na nawierzchniach asfaltowych w USA wzrosła od 81 w 1982 r. [21] do 189 w 1994 r. [22]. W 1994 r. notowano wykonanie już 189 odcinków nawierzchni betonowych na asfalcie. Były to płyty betonowe grubości 100 - 200 mm, niedyblowane, dzielone szczelinami poprzecznymi. Tylko w 14 przypadkach były to płyty o zbrojeniu ciągłym, a w 8 przypadkach płyty z fibrobetonu.

Technologia *whitetopping* jest na ogół stosowana na obszarach intensywnych kolein i pofalowania nawierzchni. Takie uszkodzenia często pojawiają się na skrzyżowaniach, parkingach, lotniskach - tam, gdzie odbywa się ciężki ruch, pojazdy hamują lub stoją.

Tradycyjnie *whitetopping* projektuje się jak nową nawierzchnię na asfaltowej podbudowie bez uwzględniania przyczepności między nakładką betonową a istniejącą nawierzchnią. Nakładki betonowe projektuje się metodą opracowaną przez Portland Cement Association (PCA) albo metodą American Association of State Highway & Transportation Officials (AASHTO). W obydwu metodach grubość płyty wyznacza się na podstawie modułu podatności "k" starej nawierzchni asfaltowej i wytrzymałości betonu za pomocą wzorów Westergaarda. Jeśli chodzi o szczeliny zaleca się, aby odstęp między nimi nie przekraczał 21 grubości płyty.

Typowe rozmiary płyt betonowych to:

- beton nie zbrojony od 2,1 do 7,6 m,
- beton zbrojony od 9 do 12 m.

Zalecane grubości płyty betonowej wg American Concrete Pavement Association (ACPA) [23] podano w tablicy 10.

Tablica 10. Zalecana grubość nakładki betonowej
Table 10. Recommend thickness of the concrete overlay

Rodzaj zastosowania	Grubość nakładki [mm]			
	Drogi główne	Drogi podrzędne	Parkingi	Lotniska
Płyty niezbrojone	150	100	100	100
Płyty o zbrojeniu ciągłym	150	150	-	150

3.2. CIENKA NAKŁADKA BETONOWA NA NAWIERZCHNI ASFALTOWEJ (*ULTRA-THIN WHITETOPPING*) [18-20, 24, 25]

Stosowanie cienkich nakładek betonowych na nawierzchniach asfaltowych, określane zapożyczonym z języka angielskiego terminem *ultra-thin whitetopping* (UTW) jest znacznie nowszym rozwiązaniem technologii *whitetopping* z typową grubością nakładki od 50 do 100 mm. Zasadnicza nowość polega na tym, że w technologii *ultra-thin whitetopping* wykorzystuje się konstrukcyjne możliwości nawierzchni asfaltowej w konstrukcji zespolonej. Współdziałanie konstrukcyjne warstw pozwala na redukcję naprężeń zginających w nakładce i umożliwia redukcję grubości nakładki.

Typowymi cechami technologii *ultra-thin whitetopping* są przyczepność pomiędzy nakładką a istniejącą nawierzchnią oraz stosowanie niewielkich odległości pomiędzy szczelinami.

Pierwsze próby zastosowania technologii *ultra-thin whitetopping* w USA rozpoczęto w 1988 w Kentucky i w 1990 w Colorado, następnie w 1991 r. niedaleko Louisville.

Od 1992 r. do 1996 r. wykonano nakładki UTW na 100 odcinkach nawierzchni w USA. Były to przede wszystkim odcinki dróg na skrzyżowaniach z regulacją świetlną ruchu, gdzie występują częste postoje pojazdów, na odcinkach postojowych przed wagami, na parkingach, na placach operacyjnych lotnisk.

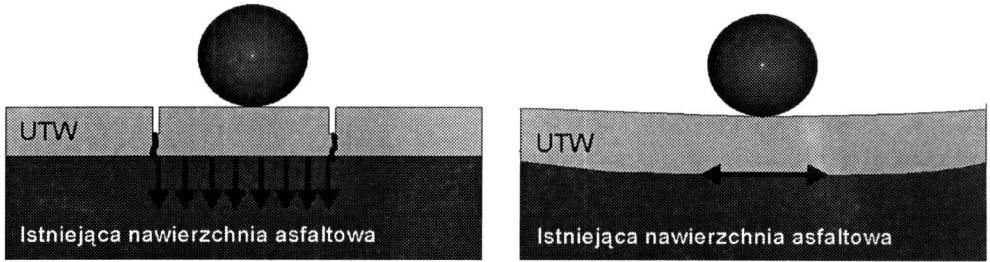
Na podstawie pierwszego zastosowania w USA (Kentucky, Louisville) zaczęto poszukiwać metod projektowania konstrukcji *ultra-thin whitetopping*. Ogólne wytyczne konstruowania zostały sformułowane przez PCA [26] i ACPA [23], ale nie odpowiadały one pracy nakładki betonowej. Autorzy pracy [27] zastosowali metodę elementów skończonych do określania naprężeń pochodzących od obciążenia ruchem oraz od deformacji powierzchni spowodowanej różnicą temperatur i wilgotności. Te analizy pokazały, że nakładka ulega szybkiemu zniszczeniu w przypadku braku przyczepności. Stwierdzili, że potrzebne są nowe metody projektowania *ultra-thin whitetopping* na podstawie analizy naprężeń i odkształceń w obu warstwach (betonowej i asfaltowej). Na bazie dalszych doświadczeń ze stosowania technologii *ultra-thin whitetopping* PCA rozwinęła nową procedurę projektowania [26, 28-30]. Procedura ta wprowadziła koncepcję częściowej przyczepności pomiędzy nawierzchnią asfaltową a nakładką betonową.

Rozstaw szczelin

Szczeliny w technologii *ultra-thin whitetopping* mają mały rozstaw: pomiędzy 0,6 i 1,8 m. Tradycyjna nawierzchnia betonowa musi być wystarczająco gruba, aby przemieścić naprężenia występujące przy zginaniu. Ponieważ w technologii *ultra-thin whitetopping* ogranicza się grubość nakładki to konieczna jest znaczna redukcja odległości między szczelinami. Wówczas obciążenie kołem jest przekazywane do leżącej poniżej warstwy asfaltowej: przy niewielkim rozstawie szczelin praca nakładki upodabnia się do pracy bruku (stempla) - elementy nawierzchni nie ulegają zginaniu (rozciąganiu) tylko ściskaniu (rys. 1).

Na podstawie doświadczeń ustalono, że maksymalny rozstaw szczelin powinien wynosić od 12 do 15 grubości płyty (pomiędzy $0,61 \times 0,61$ m a $2,0 \times 2,0$ m).

Oprócz naprężeń od zewnętrznego obciążenia, zmiany temperatury i wilgotności powodują powstawanie w warstwach naprężeń wewnętrznych. Gradient temperatury powoduje odrywanie się i zwijanie narożników płyt. Krótkie odległości między szczelinami redukują też te naprężenia. Charakterystyczne szerokości i głębokości szczelin wynoszą: szerokość 3 mm i głębokość pomiędzy 1/3 a 1/4 grubości płyty.



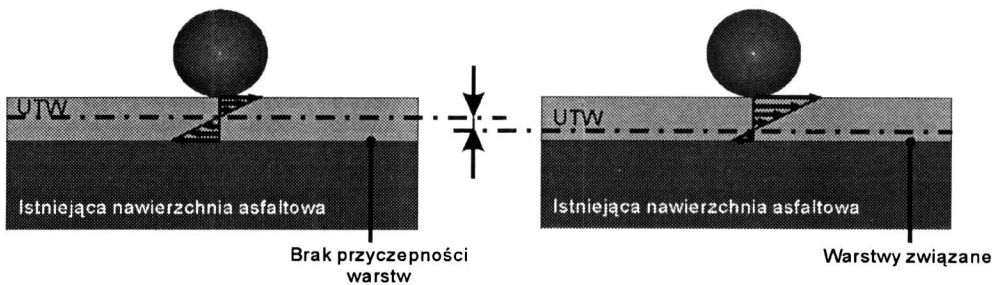
Rys.1. Wpływ rozstawu szczelin [24]

Fig.1. Influence of the distance between joints [24]

Przyczepność pomiędzy betonem a nawierzchnią asfaltową

W betonowej nawierzchni drogowej zarysowania pojawiają się, gdy naprężenia w betonie przekraczają wytrzymałość na rozciąganie betonu. Naprężenia wywołane są obciążeniem kołami, a także oddziaływaniami klimatycznymi.

Przyczepność pomiędzy betonem a nawierzchnią asfaltową pozwala na pracę warstw jako nawierzchni zespolonej. Oś obojętna na wykresie rozciągania przesuwają się ku dołowi, co zmniejsza naprężenia rozciągające w betonie (rys. 2).



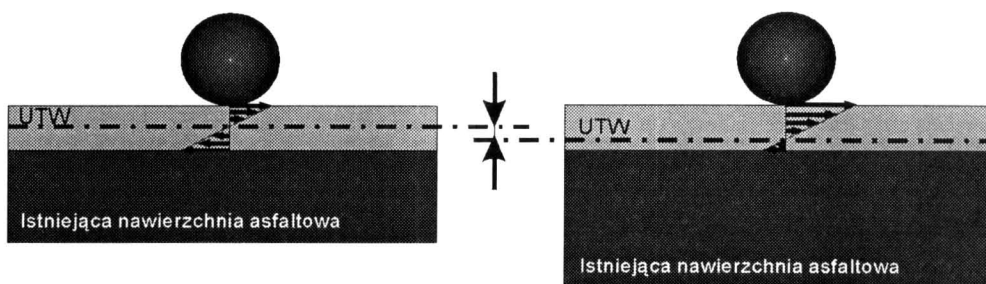
Rys.2. Wpływ przyczepności międzywarstwowej na pracę nawierzchni złożonej [24]

Fig.2. Influence of the bond between asphalt and concrete on pavement performance [24]

Inaczej dzieje się z naprężeniami przy narożu płyty. Naroże płyty zachowuje się jak wspornik, w którym naprężenia rozciągające są u góry, kiedy więc oś obojętna w warstwie betonowej przesuwają się ku dołowi naprężenia się zwiększają. Dzięki powiązaniu z podłożem asfaltowym naprężenia są mniejsze, niżby były w płycie leżącej swobodnie.

Grubość nawierzchni asfaltowej

Duże znaczenie ma też grubość warstwy asfaltowej pod płytą betonową. Nakładki UTW wykonuje się na odcinkach, gdzie istnieje wystarczająca grubość i nośność warstw bitumicznych, gwarantująca odpowiednie podparcie nakładki (rys. 3). Wg [31] rekomendowana grubość warstwy asfaltowej pod *ultra-thin whitetopping* po frezowaniu powinna wynosić minimum 75 mm, wg ACPA [32] 75 mm, wg raportu Colorado DOT [33] 125 mm.



Rys.3. Wpływ grubości nawierzchni asfaltowej na pracę nawierzchni złożonej [24]

Fig.3. Influence of the thickness of the remaining asphalt layer on pavement performance [24]

3.3. WYBRANE DOŚWIADCZENIA W STOSOWANIU NAKŁADEK BETONOWYCH NA NAWIERZCHNIACH ASFALTOWYCH

Droga niedaleko Louisville, Kentucky, USA, 1991 [34]

Na drodze dojazdowej o natężeniu ruchu 400- 600 samochodów ciężarowych na dobę przez $5\frac{1}{2}$ dni w tygodniu wykonano płyty betonowe o charakterystyce podanej w tablicy 11.

Nakładkę wykonywano podczas weekendu. Stan nawierzchni był monitorowany, pojawiły się zarysowania narożników. Po roku obserwacji tej nawierzchni wyciągnięto następujące wnioski:

- beton grubości 50 do 90 mm na asfalcie może przenosić duży ruch,
- zastosowanie betonu o wczesnej wysokiej wytrzymałości i włókien pozwoliło ograniczyć zamknięcie drogi na czas krótszy niż 48 godzin,
- główne uszkodzenia polegały na odłamywaniu się naroży płyt,

- rozstaw szczelin 1,83 m w przypadku nakładki grubości 50 mm okazał się za duży,
- związanie warstw znacznie zmniejsza naprężenia w nakładce, konwencjonalne metody nie są odpowiednie do projektowania *ultra-thin whitetopping*.

Tablica 11. Charakterystyka nakładki betonowej
Table 11. Characteristics of thin concrete overlays

Stan istniejącej nawierzchni	uszkodzona	
Rodzaj ruchu	ciężki	
Przygotowanie podłoża	frezowanie	
Warstwa szepna	brak	
Grubość nakładki	90 mm	50 mm
Rodzaj nakładki	beton z dodatkiem włókien	
Rodzaj włókien	polipropylenowe	
Rozstaw szczelin	1,83 m	1,83 m i 0,61 m

Doświadczenia belgijskie, 1984 [10]

Charakterystykę zastosowań nakładek betonowych w Belgii przedstawiono w tablicy 12.

Tablica 12. Charakterystyka nakładek betonowych
Table 12. Characteristics of thin concrete overlays

Miejsce stosowania	Gaurain	Vaulx	Jalhay	Aalst
Data wykonania	1984	1987	1985	1989
Stan istniejącej nawierzchni asfaltowej	koleiny	koleiny	mocno uszkodzona	koleiny
Rodzaj ruchu	bardzo ciężki	bardzo ciężki	lekki	ciężki
Przygotowanie podłoża	usunięcie kolein	usunięcie kolein	wzmocnienie 6 cm warstwą asfaltową	usunięcie kolein
Grubość nakładki	100 i 120 mm	120 mm	100 mm	120 mm
Rodzaj i zawartość włókien	Dramix 50/50 i 60/80 30 kg/m ³	Dramix 60/80 30 kg/m ³	Dramix 60/80 35 i 40 kg/m ³	Dramix 50/50 30 kg/m ³
Długość płyt	10 i 15 m	10 m	15 m	10 m

W 1992 roku dokonano oględzin wykonanych nakładek. Stwierdzono bardzo dobrą przyczepność. W przypadku zastosowań w miejscowościach Gaurain i Vaultx stwierdzono lokalne rozwarstwienia.

E4 (obecnie nr 255) koło Märsta, Szwecja, 1993 [35]

Drugi w Szwecji odcinek próbny o długości 450 m wykonano w 1993. Istniejąca nawierzchnia asfaltowa o grubości 150 mm została przygotowana do wykonania nakładki betonowej przez frezowanie od 5 do 60 mm. Wykonano nakładki o charakterystyce przedstawionej w tablicy 13.

Tablica 13. Charakterystyka nakładek betonowych
Table 13. Characteristics of thin concrete overlays

Stan istniejącej nawierzchni	uszkodzona		
Rodzaj ruchu	ciężki		
Przygotowanie podłoża	frezowanie od 5 do 60 mm		
Warstwa szepna	brak		
Grubość nakładki	70 mm	70 mm	70 mm
Rodzaj nakładki	fibrobeton		beton
Rodzaj włókien	stalowe Dramix 30/0,5 40 do 50 kg/m ³		-
Rozstaw szczelin	3,5×3,75 m	1,25×1,25 m	1,25×1,25 m

Szczeliny nacinano na głębokość 25 mm i szerokość 3 mm, podczas nacinania pojawiło się kilka małych uszkodzeń krawędzi. Osiem miesięcy po oddaniu do ruchu stwierdzono dobrą przyczepność nakładki. Obserwacje uszkodzeń prowadzono od 1993 do 1995 i stwierdzono pojawianie się poprzecznych zarysowań skurczowych na odcinkach z dużym rozstawem szczelin, uszkodzenia w okolicach poprzecznych szczelin (lokalne uszkodzenia mające związek z nacinaniem szczelin). Po otwarciu dla ruchu część krawędzi wykruszała się - najwięcej takich uszkodzeń zaobserwowano na betonie bez włókien. Inne zaobserwowane uszkodzenia to zarysowania narożników - na odcinku ze szczelinami 3,5×3,75 m (bardzo małe). Na odcinkach z mniejszymi szczelinami nie stwierdzono zarysowań. Stwierdzono korzystny wpływ włókien na zarysowania, ale po 3 zimach stwierdzono powierzchniowe zużywanie się nawierzchni, skoncentrowane na wewnętrznej części pasma ruchu i głównie na odcinkach z włóknami - prawdopodobna przyczyna wg autorów to niejednorodność i złe zagęszczenie mieszanki betonowej. Uszkodzenia te nie były skoncentrowane pod kołami, ale równomiernie rozłożone na całej powierzchni nakładki betonowej.

Autostrada 21, Iowa County, Iowa, USA, 1994 [36]

W 1994 r. Iowa Department of Transportation we współpracy z FHWA i Iowa State University wykonał 11,7 km nakładkę *ultra-thin whitetopping* na autostradzie 21 w Iowa County, w tym 41 odcinków próbnych. Przewidziano dwa cele badawcze:

- ocenę przyczepności międzywarstwowej pomiędzy nakładką betonową a nawierzchnią asfaltową w czasie, w funkcji zmiennego przygotowania podłoża, grubości nakładki, rozstawu szczelin i stosowania włókien syntetycznych
- poznanie możliwości naprawy nakładek i przedłużenia okresu ich użytkowania.

Stara nawierzchnia wykonana została w latach 1958 - 1987, grubość betonu asfaltowego wynosiła 75 mm. Nawierzchnia poddana jest dużym obciążeniom ruchem ciężkim, ciężarowym, stwierdzono koleiny o głębokości około 15 mm, liczne zarysowania.

Na odcinkach próbnych różnicowano grubość płyt betonowych, wymiary płyt, przygotowanie podłoża asfaltowego, a także zastosowanie włókien w betonie:

- grubości nakładki betonowej: 50, 100, 150 i 200 mm,
- trzy odcinki z nakładką z betonu asfaltowego o grubości 115 mm,
- dyblowanie w szczelinach na niektórych odcinkach o grubości nakładki betonowej 200 mm,
- rozstaw szczelin: 0,6×0,6 m, 1,2×1,2 m, 1,8×1,8 m przy grubości nakładki 50, 100 i 150 mm oraz 3,7; 4,6 i 6,1 m przy grubości 200 mm, szczeliny wypełnione lub nie,
- dwa rodzaje włókien polipropylenowych stosowanych w ilości 1,8 kg/m³,
- przygotowanie podłoża:
 - frezowanie 10 mm z oczyszczaniem podłoża,
 - zamiatanie, załatanie uszkodzeń i położenie nakładki bezpośrednio na tak przygotowane podłoże,
 - recykling na zimno.

Nakładkę wykonano ze zwykłej mieszanki betonowej, wierzch teksturowano, prowadzono pielęgnację materiałem zawierającym biały pigment. Nacięcia wykonano tak szybko jak to możliwe.

Badania prowadzone podczas budowy i przez 5 kolejnych lat obejmowały kontrolę wizualną uszkodzeń, pomiar naprężeń, ugięć oraz badanie przyczepności. W ciągu pierwszych 5 lat kontrolę przeprowadzano 4 razy w roku, w następnych latach 2 razy na rok. Podczas wykonania nakładek zamontowano w nich czujniki tensometryczne (w złączach). Pomiaru ugięć wykonywano urządzeniem FWD, dwukrotnie w ciągu pierwszych 5 lat pobrano odwierty.

Podczas wykonania nakładek na kilku odcinkach pojawiły się zarysowania spowodowane zbyt późnym nacięciem szczelin.

Po 2 latach użytkowania stwierdzono drobne zarysowania na dwóch odcinkach z nakładką betonową; odcinki z nakładką asfaltową miały poprzeczne zarysowania.

Ogólne wnioski wynikające z oględzin stanu nawierzchni były następujące:

- poważne uszkodzenia, zagrażające możliwości eksploatacji nakładki stwierdzono tylko na odcinkach z nakładkami o grubości 50 i 100 mm, stwierdzono że są one podatne na uszkodzenia podczas wykonania i możliwe słabości podłoża i starej nawierzchni,
- tylko dwa z ośmiu odcinków z nakładkami o grubości 50 mm wykazywały jakieś rozwarstwienia i niebezpieczne zarysowania,
- dwa odcinki z nakładką betonową o grubości 50 mm, wykazujące rozwarstwienia i niebezpieczne zarysowania, nie zawierały włókien; dwa odcinki o grubości 50 mm z fibrobetonu miały drobne zarysowania, ale nie było rozwarstwień, pozostałe cztery odcinki o grubości 50 mm z fibrobetonu nie wykazywały zarysowań ani rozwarstwień,
- poprzeczne zarysowania wystąpiły na trzech odcinkach asfaltowych,
- najlepszym sposobem przygotowania podłoża do układania nakładki każdej grubości jest frezowanie,
- po 2 latach nakładki o małej grubości z fibrobetonu wykazują lepsze właściwości niż te z betonu bez włókien.

Lotnisko Spirit of St. Louis, Chesterfield, Missouri, 1995 [37]

Na starej nawierzchni asfaltowej w złym stanie, o średniej grubości 79 mm, wykonano nakładki betonowe o grubości od 89 do 254 mm z uwzględnieniem przewidywanego obciążenia lekkimi lub ciężkimi samolotami. W technologii *ultra-thin whitetopping* wykonano 7200 płyt, wśród których było sześć płyt eksperymentalnych (z czujnikami) o rozmiarach $1,3 \times 1,3$ m i grubości 89 mm. Fibrobeton zawierał fibrylowane włókna polipropylenowe w ilości $1,8 \text{ kg/m}^3$. Dwie płyty miały normalne szczeliny nacięte na $1/3$ grubości i nie było pod nimi ani szczelin ani zarysowań w podłożu asfaltowym. Dwie płyty miały z jednej strony szczeliny przez całą wysokość nakładki aż do nawierzchni asfaltowej celem symulowania swobodnych krawędzi, pozostałe dwie płyty były izolowane tj. miały nacięcia do nawierzchni asfaltowej na całym obwodzie.

Przygotowanie podłoża odbyło się przez frezowanie i oczyszczenie sprężonym powietrzem. Pobrane odwierty potwierdziły uzyskanie właściwej przyczepności nakładki do starej nawierzchni asfaltowej.

Analiza naprężeń w nakładkach wykazała, że pod normalnymi szczelinami obciążenie na środku lub na szczelinie powodowało podobne naprężenia w nawierzchni. Nie stwierdzono znaczących różnic wyników pomiarów w różnych porach roku (maj, wrzesień) mimo różnych temperatur. Mimo zmieniających się temperatur w płytach, nie stwierdzono widocznych różnic w mierzonych naprężeniach we wszystkich miejscach pomiaru i dla wszystkich badanych płyt. Naprężenia obserwowane przy swobodnych

krawędziach były znacznie większe niż obserwowane pod normalnymi szczelinami lub na środku płyty.

Ocenę nawierzchni przeprowadzono w 2001 r. po 6 latach użytkowania i stwierdzono bardzo dobry stan nawierzchni. Na 18 płytach z 7200 stwierdzono niewielkie uszkodzenia w postaci zarysowania narożników. Uszkodzone płyty zlokalizowane są na wejściu na płytę lotniska.

Doświadczenia uzyskane podczas wykonania nakładki pozwoliły stwierdzić, że:

- warstwa betonowa doznaje większych różnic temperatur niż warstwa asfaltowa,
- przy projektowaniu nakładek UTW należy uwzględnić częściową przyczepność między warstwami,
- frezowanie i czyszczenie podłoża przyczynia się do znaczącej poprawy przyczepności nakładki betonowej do nawierzchni asfaltowej.

Autostrada Rte. 29 koło Charlottesville, Virginia, USA, 1995 [17]

Na istniejącej skoleinowanej nawierzchni asfaltowej wykonano w 1995 r. nakładkę betonową o charakterystyce przedstawionej w tablicy 14.

Tablica 14. Charakterystyka nakładki betonowej
Table 14. Characteristics of thin concrete overlays

Stan istniejącej nawierzchni	uszkodzona, koleiny
Rodzaj ruchu	ciężki
Przygotowanie podłoża	frezowanie
Warstwa szcpepna	brak
Grubość nakładki	51, 76 i 102 mm
Rodzaj nakładki	fibrobeton
Rodzaj włókien	- stalowe 30×0,5 mm 29,7 kg/m ³ i 44,5 kg/m ³ - polipropylenowe 3,0 kg/m ³ - poliolefinowe dł. 25 mm 11,9 kg/m ³

Na nakładce o grubości 51 mm zaraz po otwarciu dla ruchu stwierdzono zarysowania narożników, powodem uszkodzeń była zbyt mała grubość wykonanej nakładki. W roku 1999 przeprowadzono oględziny i badania wykonanych nakładek betonowych. Na nakładkach o grubości 76 i 102 mm nie stwierdzono uszkodzeń. Na nakładce o grubości 51 mm stwierdzono uszkodzenia o największym nasileniu na odcinkach z fibrobetonu z włóknami stalowymi w ilości 30 kg/m³ oraz włóknami polipropylenowymi.

Nie zauważono występowania rozwarstwień. Przyczepność badano na odwiertach. Stwierdzono niską przyczepność, przy czym większość przełomów przebiegała w warstwie nawierzchni asfaltowej. Po zakończeniu badań okazało się, że nakładka o grubości 51 mm na istniejących nawierzchniach asfaltowych jest niewystarczająca.

Autostrada I-94, Minnesota, USA, 1997 [38]

Nakładka fibrobetonowa w technologii *ultra-thin whitetopping* została wykonana w 1997 r. na istniejącej nawierzchni asfaltowej o grubości 345 mm. Celem projektu była ocena możliwości stosowania tej technologii na mocno obciążonych drogach. Wykonano 6 odcinków doświadczalnych różniących się grubością nakładki, rozstawem szczelin i typem włókien. Istniejącą nawierzchnię asfaltową frezowano na głębokość zależną od grubości nakładki betonowej. Charakterystykę wykonanych nakładek przedstawiono w tablicy 15.

Tablica 15. Charakterystyka nakładek betonowych
Table 15. Characteristics of thin concrete overlays

Grubość nakładki [mm]	Rodzaj włókien	Rozstaw szczelin [m]
76	polipropylenowe	1,2 × 1,2
76	poliolefinowe	1,5 × 1,8
102	polipropylenowe	1,5 × 1,8
152	polipropylenowe	1,5 × 1,8
152	polipropylenowe	3,1 × 3,7
152	polipropylenowe	3,1 × 3,7, dyble o średnicy 25 mm

Sprawdzano wpływ warunków środowiskowych (zmiany temperatury, wilgotności) na deformację tego typu nawierzchni.

Nieliczne zarysowania na niektórych odcinkach zostały zaobserwowane po roku od otwarciu dla ruchu, ale generalnie większość odcinków jest w dobrym stanie do chwili obecnej. Monitoring stanu nawierzchni będzie prowadzony do końca okresu eksploatacji nawierzchni.

Oględziny wykonanej nawierzchni przeprowadzane są 4 razy w ciągu roku od wybudowania. Pęknięcia narożników i poprzeczne zarysowania pojawiły się powszechnie na odcinkach wykonanych w technologii *ultra-thin whitetopping*. Po 3,5 roku uszkodzenia wywołane oddziaływaniem temperatur i obciążeń były widoczne na odcinkach z nakładkami o grubościach 76 mm i 102 mm, część ze stwierdzonych

uszkodzeń była "odbita" z nawierzchni asfaltowej. Stwierdzono, że włókna poliolefinowe lepiej powstrzymywały zarysowania niż polipropylenowe, nie zauważono zarysowań na nakładce o grubości 152 mm.

Większość zarysowań była funkcją rozkładu szczelin. Szczelina podłużna w płytach $1,2 \times 1,2$ m była ulokowana w śladzie koła. Rezultatem były zarysowania narożników w nakładkach o grubości 76 mm i 102 mm. Nakładka 76 mm ze szczelinami $1,5 \times 1,8$ była w dużo lepszym stanie, ponieważ szczelina podłużna była zlokalizowana poza śladem koła. To pokazuje, że optymalny rozkład szczelin ma znaczny wpływ na trwałość nawierzchni.

Doświadczalne zastosowanie nakładki betonowej podczas badań prowadzonych przez FHWA i ACPA, USA, 1998 [39]

W kwietniu 1998 r. Federal Highway Administration (FHWA) i American Concrete Pavement Association (ACPA) rozpoczęły badania nakładek UTW w naturalnej skali. Badania zostały przeprowadzone w laboratorium FHWA's Pavement Testing Facility w MaLean, Virginia. W nakładce betonowej zamontowano czujniki tensometryczne, czujniki LVDT, termopary. Badania prowadzono na 8 pasach z zastosowaniem różnych wariantów konstrukcyjno-materiałowych. Program badań obejmował:

- dwie grubości starej nawierzchni asfaltowej: grubość po frezowaniu 114 i 140 mm,
- dwie grubości nakładki betonowej: 64 i 89 mm,
- trzy warianty rozstawu szczelin dylatacyjnych: 0,9; 1,2 i 1,8 m,
- zastosowanie włókien fibrylowanych polipropylenowych w ilości $1,78 \text{ kg/m}^3$.

Badania obciążeniowe prowadzone były pomiędzy majem 1998 a listopadem 1999 r. przy zastosowaniu Accelerated Loading Facility (ALF: podwójne koła, całkowite obciążenie 53,4 kN, ekwiwalent obciążenia 106,8 kN na oś). Szczegółowe obserwacje uszkodzeń były prowadzone regularnie na wszystkich odcinkach doświadczalnych. Niektóre z odcinków wykazywały zarysowania pod ciężkim obciążeniem zgodnie z przewidywaniami (pasma 6 po 359 000 przejściach obciążenia, pasmo 10 po 441 000 przejściach obciążenia). Większość form obserwowanych uszkodzeń to odłamania naroży oraz zarysowania poprzeczne i podłużne. Uszkodzenia zaobserwowano na powierzchni pasma 6 (grubość nakładki 64 mm, nawierzchnia asfaltowa 140 mm, 1,2 m rozstaw szczelin) oraz pasma 10 (grubość nakładki 89 mm, nawierzchnia asfaltowa 114 mm, 1,8 m rozstaw szczelin). Pasma te naprawiono w 2000 r. poprzez usunięcie uszkodzonych płyt i wykonanie nowych. Podczas usuwania nakładki betonowej stwierdzono bardzo dobrą przyczepność betonu do nawierzchni asfaltowej. Całość odcinków doświadczalnych poddano dalszym obciążeniom. Na naprawianych odcinkach nie stwierdzono uszkodzeń powierzchni asfaltu.

Badania na stanowisku badawczym Accelerated Pavement Testing (APT) Indiana Department of Transportation Research Division in West Lafayette, Indiana, 1999 [40]

Badania obejmowały technologię *ultra-thin whitetopping* poddaną obciążeniom wolno poruszającego się bardzo ciężkiego ruchu. Badania prowadzono na 4 pasach o szerokości 1,2 m i długości 7 m.

Na wszystkich pasach rozstaw szczelin był identyczny i wynosił 1,2 m. Jako dodatek do betonu zastosowano włókna poliolefinowe 50/63 w ilości 10 kg/m³. Zamontowano czujniki tensometryczne, LVDT. Przebieg obciążania przedstawiono w tablicy 16.

Tablica 16. Charakterystyka nakładek i przebieg obciążania
Table 16. Schematic of the lane layouts and the test plan

Numer odcinka	Pasmo 1	Pasmo 2	Pasmo 3	Pasmo 4
Charakterystyka nakładki	104 mm beton bez włókien	104 mm fibrobeton	63,5 mm beton bez włókien	63,5 mm fibrobeton
Charakterystyka obciążenia	obciążenie kołem 5,45 kN przez pierwsze 30000 przebiegów, 9,08 kN przez kolejne 70000 przejeżdż, łącznie 100000 przebiegów	nie był badany	obciążenie kołem 5,45 kN 150000 przejeżdż	obciążenie kołem 9,08 kN 250000 przebiegów, po 60000 przebiegów badanie, obciążenie zmiennymi temp.

Na podstawie wyników badań stwierdzono:

- Właściwości wszystkich nakładek UTW były bardzo satysfakcjonujące. Na odcinku o grubości 104 mm wystawionym na działanie obciążeń na dwóch poziomach (5,45 kN i 9,08 kN) nie rozwinęły się żadne znaczące odkształcenia lub ugięcia po 100 000 przejazdów. Nakładka o grubości 63,5 mm na paśmie 3 też zachowywała się bardzo dobrze. Pod obciążeniem 5,45 kN nie stwierdzono trwałego ugięcia i odkształceń po 150 000 przejazdów. Nakładka o grubości 63,5 mm na paśmie 4 wystawiona na 250 000 przejeżdż ciężkiego obciążenia 9,08 kN i zmienną temperaturę nie doznała uszkodzeń konstrukcyjnych.
- Rozstaw szczelin wynoszący 1,2 m na wszystkich pasmach był dobrany właściwie.
- Naprężenia mierzone w nakładkach były proporcjonalne do obciążenia, co sugeruje, że odpowiedź nawierzchni była liniowa. Wzrost temperatury na paśmie 4 wpływał na liniową odpowiedź nawierzchni, naprężenia w warstwie asfaltowej wzrastały znacznie z powodu gradientu temperatury.
- Stwierdzono dobrą przyczepność pomiędzy nakładką betonową a nawierzchnią asfaltową.

4. WNIOSKI WYNIKAJĄCE Z DOTYCHCZASOWYCH DOŚWIADCZEŃ STOSOWANIA NAKŁADEK BETONOWYCH

Pierwsze zastosowania wzmocnień warstwami związanymi z podbudową pojawiły się w USA już w 1913 r. Do chwili obecnej na całym świecie stosowane były różne rozwiązania materiałowe, które zmieniały się wraz z postępem technologicznym. Autorzy opracowań opisujących przykłady zastosowań wzmocnień nakładkami betonowymi, zebrane w poprzednich punktach, przedstawiają szereg czynników wpływających na trwałość konstrukcji warstwowych.

Jako główne przyczyny uszkodzeń można wymienić:

- niewłaściwe lub źle przygotowane podłoże,
- niewłaściwy wybór i zastosowanie materiałów warstwy naprawczej (nakładki betonowej) i ewentualnej warstwy szczepnej,
- zbyt duży rozstaw szczelin,
- wykonywanie prac przy niekorzystnych warunkach zewnętrznych,
- niewłaściwa pielęgnacja wykonanej warstwy betonowej,
- zbyt późne nacięcie szczelin.

Zebrane doświadczenia wskazują, że podstawowe znaczenie dla trwałości wzmocnienia warstwowego ma zespolenie warstwy naprawczej z podłożem [41]. Uzyskanie zespolenia jest szczególnie istotne przy wykonywaniu wzmocnienia cienkimi warstwami, gdzie obawy przed powstaniem rozwarstwienia ograniczają powszechność stosowania takiego rozwiązania.

Rozwarstwianie jest konsekwencją efektu zginania złącza i zarysowania warstwy naprawczej. Utrata przyczepności międzywarstwowej jest bezpośrednią konsekwencją zarysowania, to zaś rezultatem ugięcia, jakiego doznaje konstrukcja obciążana cyklicznie. Tak więc trwałość połączenia pomiędzy cienką warstwą naprawczą a podłożem betonowym, zależy od rodzaju warstwy naprawczej [4-6]. Właściwości fibrobetonów, takie jak: wysoka odporność na powstawanie rys, zdolność do hamowania ich wzrostu, duża odporność na obciążenia dynamiczne, udarowe i zmęczeniowe, pozwalają pozytywnie oceniać efekty ich stosowania na trwałość konstrukcji nawierzchni.

Trwałość połączenia przy stosowaniu nakładek fibrobetonowych uzależniona jest od:

- efektywności włókien w zakresie powstrzymania zarysowania,
- przyczepności włókien do matrycy cementowej,
- relacji pomiędzy grubością warstwy naprawczej i podłoża.

W publikacjach [42, 43] autorzy wykazali, że nie mają znaczącego wpływu czynniki takie jak:

- zbrojenie włóknami stosowanymi w niewielkich ilościach,

- zmiana grubości warstw naprawczych,
- podwyższenie wytrzymałości warstwy naprawczej,
- wytrzymałość na ścinanie na styku warstw.

W złączu pomiędzy nakładką betonową a istniejącą nawierzchnią pojawiają się naprężenia normalne i ścinające [7]; największe są na krawędziach i narożnikach. Naprężenia ściskające mogą być pomijane. Według [7] delaminacja rozpoczyna się w narożach i krawędziach i postępuje w kierunku środka płyty.

Mimo licznych sukcesów, niektóre z wykonanych nakładek betonowych ulegały uszkodzeniom - pojawiały się rozwarstwienia i zarysowania. Na podstawie przeglądu zastosowań można sformułować wnioski dotyczące stosowania konstrukcji warstwowych:

- przyczepność pomiędzy nakładką betonową a istniejącą nawierzchnią znacząco redukuje naprężenia w nakładce betonowej, prowadzi do zespolenia konstrukcji,
- stosowanie nakładek fibrobetonowych z włóknami stalowymi korzystnie wpływa na zapobieganie lub opóźnianie procesów zarysowania warstw naprawczych,
- metody przygotowania podłoża powinny pozwalać na dokładne usunięcie uszkodzonej lub słabej warstwy istniejącego podłoża i wszelkich zanieczyszczeń, w przypadku nawierzchni betonowych śrutowanie lub piaskowanie to lepsze metody przygotowania podłoża niż frezowanie, bo dają lepszą przyczepność, w przypadku nawierzchni asfaltowych przyczepność jest poprawiana przez frezowanie i oczyszczenie starej nawierzchni, korzystna jest ekspozycja kruszywa w asfalcie,
- przygotowane podłoże powinno być czyste, nośne i szorstkie, po nawilżeniu podłoża betonowego nie należy na jego powierzchni pozostawiać zastoisk wody,
- czas pomiędzy przygotowaniem i nawilżeniem podłoża a układaniem nakładki betonowej powinien być minimalizowany,
- stosowanie warstw szepnych nie jest konieczne,
- beton nakładki powinien być zagęszczany, ale nie za mocno, aby nie spowodować rozsegregowania mieszanki,
- wykonana warstwa naprawcza powinna być odpowiednio pielęgnowana,
- szczeliny powinny być nacinane tak szybko jak to możliwe,
- warunki wykonywania nakładek betonowych i ich pielęgnacji powinny być monitorowane,
- nakładka powinna być wykonana zanim istniejąca nawierzchnia będzie zniszczona,
- przed zaprojektowaniem nakładki betonowej należy ocenić stan techniczny istniejącej nawierzchni,

- rysy na istniejącej nawierzchni przy dużym ruchu powinny być naprawione przed wykonaniem nakładki,
- istotne znaczenie dla właściwości konstrukcji warstwowej ma grubość istniejącej nawierzchni asfaltowej; rekomenduje się, aby istniejąca nawierzchnia po frezowaniu miała, co najmniej 75 mm,
- płyty z mniejszym rozstawem szczelin w technologii *ultra-thin whitetopping* pracują efektywniej.

Celem prawidłowego wykonania nakładki betonowej przed przystąpieniem do realizacji należy wykonać szereg prac wstępnych.

Prace projektowe obejmują:

- określenie stanu istniejącego (m.in. nośność, uszkodzenia) nawierzchni,
- określenie stanu innych warstw nawierzchni, parametry podłoża, rozwiązanie odwodnienia,
- określenie zakładanego rodzaju i natężenia ruchu,
- określenie wymaganej jakości betonu, jego trwałości i wytrzymałości,
- określenie grubości nakładki,
- określenie właściwego rozmieszczenia szczelin dylatacyjnych, tak, aby uniknąć niepożądanych pęknięć płyt,
- zapewnienie właściwego przenoszenia obciążeń przez szczeliny.

Prace przygotowawcze przed wykonaniem nakładki to:

- ocena stanu nawierzchni,
- wykonanie ewentualnej naprawy nawierzchni,
- przygotowanie nawierzchni.

5. TECHNOLOGIA STOSOWANIA NAKŁADEK BETONOWYCH [44, 19, 45]

5.1. MATERIAŁY NA NAKŁADKI

Materiały, z których wykonywane są nakładki muszą być starannie wybrane pod kątem:

- wytrzymałości (zarówno wytrzymałości długotrwałej jak i wytrzymałości na obciążenia dynamiczne),
- trwałości (odporność na oddziaływania chlorków, substancji chemicznych, mrozu),
- kompatybilności (celem minimalizacji różnic naprężeń i skurczów).

Skład mieszanki betonowej jest uzależniony od przewidywanego obciążenia ruchem oraz czasu oddania nawierzchni do ruchu. Typowa mieszanka betonowa zawiera materiały cementowe (cement, popiół lotny), kruszywo gruboziarniste, kruszywo drobnoziarniste, środki napowietrzające, domieszki. W wielu projektach stosuje się fibrobeton z włóknami syntetycznymi lub stalowymi. Często stosuje się beton o wysokiej wczesnej wytrzymałości (powyżej 20 MPa w ciągu 24 h).

Kruszywa o dużej nasiąkliwości lub o wysokim współczynniku rozszerzalności, a także mieszanki betonowe o wysokim cieple hydratacji nie powinny być stosowane. Wielkość ziaren kruszywa należy dobrać do grubości warstwy. W przypadku nakładek na nawierzchniach betonowych mieszanka musi mieć wystarczającą ilość wody dla zaczynu do wytworzenia absorpcji do betonu podłoża.

5.2. WARSTWY SZCZEPNE

Jako warstwy szczepne pomiędzy istniejącą nawierzchnią betonową a nakładką betonową stosuje się zaczyn cementowy lub materiały epoksydowe. Między innymi w publikacji [2] autorzy wykazali, że nie jest to konieczne. W rzeczywistości warstwa szczepna może działać jak warstwa poślizgowa, jeżeli nakładka betonowa nie zostanie położona w odpowiednim czasie.

5.3. ŁĄCZNIKI

Łączniki mechaniczne są stosowane, aby poprawić bezpieczeństwo połączenia. Obniżają prawdopodobieństwo lub hamują rozwój delaminacji.

5.4. SZCZELINY

Szczeliny powinny być nacinane lekką maszyną tak wcześnie jak to możliwe. Należy starannie dobrać czas cięcia - zbyt wczesne rozpoczęcie cięcia spowoduje wykruszenie się ziaren kruszywa ze szczeliny, zbyt późne powstanie wcześniej niekontrolowanych spękań; w normalnych warunkach pogodowych odbywa się to w 4 do 12 godzin po rozłożeniu mieszanki.

Głębokość nacięcia powinna wynosić w granicach $1/4$ - $1/3$ grubości warstwy betonowej; w miejscach, gdzie szczelina przechodzi nad głębokimi deformacjami cięcia powinny być głębsze.

Ewentualne wypełnianie szczelin powinno być wykonane przy użyciu materiału, który zapewni ich szczelność, a jednocześnie będzie trwały, np. zalewy polimerowe, bitumiczne, polimeroasfaltowe i inne.

5.5. WYKONANIE NAKŁADEK BETONOWYCH

Kolejność prac przy wykonywaniu warstwy naprawczej - cienkiej nakładki betonowej na istniejącej nawierzchni betonowej lub asfaltowej jest następująca:

- usunięcie uszkodzonej warstwy nawierzchni betonowej lub asfaltowej,
- oczyszczenie i usunięcie silnym strumieniem wody luźno połączonych pozostałości; w przypadku zatuszczenia należy stosować dodatek detergentów,
- wykonanie nakładki betonowej,
- powierzchnię świeżego betonu należy uszorstnić mechanicznie lub chemicznie eksponując kruszywo,
- nacięcie szczelin dylatacyjnych,
- ewentualne wypełnienie szczelin dylatacyjnych masą zalewową lub silikonową,
- otwarcie dla ruchu.

Przygotowanie podłoża

Nawierzchnia betonowa

Podłoże pod nakładkę betonową powinno być nośne, czyste, wystarczająco szorstkie i szczepne, metody przygotowania podłoża nie mogą uszkadzać istniejącego betonu w obrębie powierzchni rozdziału. Problemy z przyczepnością pojawiają się, gdy zastosowana metoda przygotowania podłoża nie daje odpowiedniej szorstkości podłoża lub powoduje pozostawianie zanieczyszczeń. Przed nałożeniem nakładki powierzchnia powinna być zwilżona. Istotna jest właściwa wilgotność podłoża: gdy wilgotność jest za duża, występuje parowanie, gdy za mała, następuje wysuszenie wody z warstwy nawierzchniowej, co prowadzi do zarysowań skurczowych.

Do przygotowania podłoża powinny być stosowane metody powodujące odsłanianie kruszyw bez niszczenia istniejącego betonu:

- śrutowanie,
- frezowanie (nie najlepsza metoda, bo powstają zarysowania),
- piaskowanie,
- hydropiaskowanie.

Przygotowane podłoże musi mieć odpowiednią szorstkość; zalecane jest średnio 2 mm mierzone metodą piasku kalibrowanego.

Nawierzchnia asfaltowa

Czyste podłoże jest niezbędne do uzyskania właściwej przyczepności. Zalecaną metodą przygotowania podłoża jest frezowanie, ponieważ poprawia przyczepność

odslaniając ziarna kruszywa w nawierzchni asfaltowej. Jeżeli podłoże oczyszczane jest wodą, przed wykonaniem nakładki betonowej przygotowane podłoże asfaltowe należy osuszyć powietrzem.

Oczyszczone podłoże należy chronić przed zabrudzeniem aż do wykonania warstwy betonu cementowego. Jeżeli po wyfrezowanej nawierzchni odbywa się ruch pojazdów, nawierzchnię taką przed położeniem betonu należy ponownie oczyścić.

Słabe podłoże, które nie gwarantuje jednorodności podparcia całej nawierzchni (nakładce i nawierzchni asfaltowej) powinno być wymienione.

Metody przygotowania powierzchni nawierzchni asfaltowej obejmują:

- oczyszczenie mechaniczne powierzchni i bezpośrednie położenie nakładki,
- frezowanie nierówności nawierzchni asfaltowej,
- wykonanie warstwy wyrównawczej z mieszanki mineralno-bitumicznej.

W przypadkach, gdy głębokość kolein nie przekracza 50 mm, nakładkę betonową można układać bezpośrednio na oczyszczonej nawierzchni. Jeśli koleiny są głębsze, stosuje się frezowanie górnej, zniekształconej warstwy asfaltowej. Należy zwrócić uwagę, żeby przyjęta wcześniej grubość płyty betonowej była zachowana nawet nad najwyższymi punktami istniejącej nawierzchni. Większą trwałość konstrukcji warstwowej uzyskuje się, gdy nakładka układana jest na sfrezowanej nawierzchni (frezowanie na zimno), zwykle wystarczająca jest głębokość frezowania od 25 do 75 mm. W przypadku, gdy nierówności przekraczają 50 mm i nie jest możliwe frezowanie istniejącej nawierzchni asfaltowej, nakładkę układa się na warstwie wyrównawczej.

Przed przystąpieniem do wykonywania nakładki betonowej należy wziąć pod uwagę temperaturę nawierzchni asfaltowej. Wysoka temperatura wraz z temperaturą powstałą podczas hydratacji cementu mogą spowodować powstanie dużych naprężeń w betonie podczas nocnego ochładzania powierzchni nakładki. Efektem tego zjawiska są pęknięcia. Sposoby na obniżenie temperatury nawierzchni asfaltowej są następujące:

- rozpylanie wody,
- nakładanie białej powłoki z wapna.

Wykonanie nakładki betonowej i jej pielęgnacja

Warstwę betonu wykonuje się metodami konwencjonalnymi, tak jak przy nawierzchniach betonowych. Należy również zwrócić uwagę na nadanie odpowiedniej tekstury powierzchni nakładki. Szczególnie istotna jest pielęgnacja wykonanej nakładki tak, aby uniknąć powstawania rys skurczowych w warstwie betonu oraz zapobiec rozwarstwieniu się nakładki betonowej i istniejącej nawierzchni. Nakładka betonowa jest cienka, ale ma dużą powierzchnię i szybko traci wodę przez parowanie. Środki pielęgnujące powinny być aplikowane w dwukrotnie większej ilości niż normalnie. Pielęgnacja powinna się

rozpocząć już w trakcie układania mieszanki, ale należy uważać, aby nie pryskać środkiem pielęgnującym po przygotowanej nawierzchni asfaltowej, gdyż może to być powodem późniejszego rozwarstwiania się nawierzchni.

Stosowana pielęgnacja powinna być uzależniona od warunków środowiska zewnętrznego. Warunki zewnętrzne powinny być monitorowane podczas wykonywania nawierzchni i podczas pielęgnacji.

6. PODSUMOWANIE

Analizując dotychczasowe zastosowania nakładek betonowych na istniejących nawierzchniach betonowych i asfaltowych można stwierdzić, że trwałość wzmocnienia warstwowego zależy w głównej mierze od trwałości połączenia pomiędzy warstwą wzmacniającą a istniejącą nawierzchnią. Konstrukcja warstwowa powinna funkcjonować w sposób monolityczny, wzajemny styk powierzchni powinien zapewnić ciągłość przenoszenia obciążeń między nawierzchnią a podłożem, szczególnie istotne jest to w przypadku stosowania cienkich nakładek betonowych. Trwałość połączenia pomiędzy cienką nakładką a istniejącą nawierzchnią zależy od rodzaju i grubości warstwy wzmacniającej. Tak więc wybór rodzaju materiału warunkuje efektywność wykonanego wzmocnienia nawierzchni.

Instytut Badawczy Dróg i Mostów - Filia Wrocław wspólnie z Instytutem Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk oraz przy współpracy z Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (Université Paul Sabatier/INSA, Toulouse) przeprowadził badania w skali naturalnej drogowych płyt betonowych wzmacnianych cienkimi nakładkami betonowymi. Głównym celem badań była ocena zachowania konstrukcji warstwowej, a w szczególności styku warstw, pod obciążeniem oraz doświadczalne stwierdzenie zależności pomiędzy rodzajem warstwy wzmacniającej a mechanizmem niszczenia styku. Wyniki tych badań przedstawione zostaną w kolejnej części artykułu.

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Wysocki A., Żurawicka A.*: Analiza możliwości wzmacniania płyt betonowych cienkimi warstwami fibrobetonów. III Konferencja Naukowo-Techniczna "Zagadnienia materiałowe w Inżynierii Lądowej MATBUD'2000, 370-376, Kraków 2000
- [2] *Rowden L.*: Thin Bonded Concrete Overlay and Bonding Agents. Physical Research Report No. 123, Bureau of Materials and Physical Research, Illinois Department of Transportation, Springfield 1996
- [3] *Delatte N. J.*: Interface Stresses and Bond Strength in Bonded Concrete Overlays. Transportation Research Board 78th Annual Meeting, Washington D.C. 1999

-
- [4] *Granju J.L., Chausson H.*: Fiber reinforced thin bonded overlays: the mechanism of their debonding in relation with their cracking. Concrete Repair, Rehabilitation and Protection, edited by R.K.Dhir and M.R.Jones, E&FN Spon, 583-590, London, 1996
- [5] *Granju J.L., Turatsinze A., Farhat H.*: Les paradoxes de la durabilité des rechargements minces adhérents. Actes du troisième colloque international francophone sur les bétons renforcés de fibres métalliques, éd. par R.Pleau et M.Pigeon, Université Laval, 65-76, Québec 1998
- [6] *Granju J.L.*: About the debonding of thin cement-based overlays. Fracture Mechanics of Concrete Structures, (Proc. of FRAMCOS 3 Conference, 1998, Gifu, Japan), ed. by H. Mihashi & K. Rokugo, AEDIFICATIO Publ., 3, Freiburg 1998
- [7] *Delatte N.J., Laird J.T.*: Performance of Bonded Concrete Overlays, Transportation Research Board 78th Annual Meeting, Washington D.C. 1999
- [8] *Neal B.F.*: California's Thin Bonded PCC Overlay. Report No. FHWA/CA/TL-83-04, Sacramento, California 1983
- [9] *Lundy J.R., McCullough F.*: Delamination in Bonded Concrete Overlays of Continuously Reinforced Pavement. 4th International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, 221-229, Purdue University, West Lafayette 1989
- [10] *Verhoeven K., Vancraeynest Y.*: Thin Steel Fiber Reinforced Concrete Overlays and Inlays on Old Pavements - A Ten Year Belgian Experience. 5th International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, 203-210, 2, Purdue University, West Lafayette 1993
- [11] *Ibukiyama S., Kokubun S., Ishikawa K.*: Introduction of Recent Thin Bonded Concrete Overlay Construction and Evaluation of Those Performances in Japan. 4th International Conference of Concrete Pavement Design and Rehabilitation, 193-203, West Lafayette 1989
- [12] *Delatte N.J., Gräter S.F., Treviño-Farias M., Flower D.W., McCullough B.F.*: Partial Construction Report of a Bonded Concrete Overlay on IH-10, El-Paso and Guide for Expedited Bonded Concrete Overlay Design and Construction. Report 2911-5F, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, 1996
- [13] *Chanvillard G., Aitcin P.C., Lupien C.*: Field Evaluation of Steel-Fiber Reinforced Concrete Overlay with Various Bonding Mechanisms. Transportation Research Board 69th Annual Meeting, 48-56, Washington D.C. 1990
- [14] *King W.M.*: Design and Construction of a Bonded Fiber Concrete Overlay of CRCP. Report No. FHWA/LA-92/266 Louisiana Transportation Research Center, 1993
- [15] *Silfwerbrand J., Petersson O.*: Thin Concrete Inlays on Old Concrete Roads. 5th International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, 255-260, 2, Purdue University, West Lafayette 1993
- [16] *Volle T.H.*: Thin Bonded Concrete Overlays in Illinois: Preliminary Report on Performance. Transportation Research Board 80th Annual Meeting, Washington D.C. 2001

-
- [17] *Sprinkel M., Ozyildirim C.*: Evaluation of Hydraulic Cement Concrete Overlays Placed on Three Pavements in Virginia. 7th International Conference on Concrete Pavements, Orlando 2001
- [18] *Rolla S.*: Beton na asfalt - Whitetopping, Drogownictwo, 171-175, 6/2000
- [19] *Cole L.W., Mack J.W.*: Thin Bonded Concrete Overlays of Asphalt Pavement. Publikacja na stronie internetowej American Concrete Pavement Association ACPA
- [20] *Webb R., Delatte N.J.*: Performance of Whitetopping Overlays. Transportation Research Board 79th Annual Meeting, Washington D.C. 2000
- [21] *Hutchinson R.L.*: Resurfacing with Portland Cement Concrete. NCHRP Synthesis 99. TRB, National Research Council, Washington D.C. 1982
- [22] *McGhee K.H.*: Portland Cement Concrete Resurfacing. NCHRP Synthesis 204 TRB, National Research Council, Washington D.C. 1994
- [23] Guidelines for Concrete Overlays of Existing Asphalt Pavements (Whitetopping) Technical Bulletin. TB-0090D, American Concrete Pavement Association, Skokie 1991
- [24] *Caestecker Ch., Lonneux T., Haemels F.*: UTW: Test Section at Vilvoorde on the R22 in Belgium. 7th International Conference on Concrete Pavement, Orlando 2001
- [25] *Tarr S.M., Sheehan M.J., Ardani A.*: Mechanistic Design of Thin Whitetopping Pavements in Colorado. Transportation Research Board 79th Annual Meeting, Washington D.C. 2000
- [26] Design of Concrete Overlays (Whitetopping) for Asphalt Parking Lots. Pamphlet No. 153, Portland Cement Association, Skokie 1989
- [27] *Mack J.W., Cole J.W., Mohsen J.P.*: Analytical Considerations for Thin Concrete Overlays on Asphalt. Transportation Research Board 72nd Annual Meeting, Washington D.C. 1993
- [28] *Mack J.W., Wu Ch.L., Tarr S., Refai T.*: Model Development and Interim Design Procedure Guidelines for Ultra-thin Whitetopping Pavements. 6th International Conference on Concrete Pavement Design and Materials for High Performance, Purdue University, 231-256, 1, Indianapolis 1997
- [29] *Wu C., Tarr S., Ardani A., Sheehan M.*: Instrumentation and Field Testing of Ultra-thin Whitetopping Pavement. Transportation Research Board 77th Annual Meeting, Washington D.C. 1998
- [30] *Wu C., Tarr S., Refai T.M., Nagi M.A., Sheehan M.*: Development of Ultra-thin Whitetopping Design Procedure. PCA R&D Serial No. 2124, PCA, Skokie 1998
- [31] *Mack J.W., Hawbaker L.D., Cole L.W.*: Ultra-thin Whiteopping (UTW): The State-of-the-Practice for Thin Concrete Overlays of Asphalt. Transportation Research Board 77th Annual Meeting, Washington D.C. 1998
- [32] American Concrete Pavement Association, Whitetopping - State of the Practice. Engineering Bulletin EB210P, 1998

-
- [33] *Tarr S.M., Sheehan M.J., Okamoto P.A.*: Guidelines for the Thickness Design of Bonded Whitetopping Pavement in the State of Colorado. Report No. CDOT-DTD-R-98-10, 1998
- [34] *Risser R.J., LaHue S.P., Voigt G.F., Mack J.W.*: Ultra-Thin Concrete Overlays on Existing Asphalt Pavement. 5th International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, 247-254, 2, Purdue University, West Lafayette 1993
- [35] *Silfwerbrand J.*: Whitetoppings - Swedish Field Tests and Recommendations. 6th International Conference on Concrete Pavement Design and Materials for High Performance, Purdue University, 231-243, 2, 1997
- [36] *Cable J.K., Hart J., Ciha T.*: The Ultrathin Whitetopping Option. 7th International Conference on Concrete Pavement - Orlando, Florida 2001
- [37] *Wu Ch.-L., Sheehan M.J.*: Testing and Performance Evaluation of UTW Pavements at the Spirit of St. Louis Airport. Transportation Research Board 81st Annual Meeting, Washington D.C. 2002
- [38] *Vandenbossche J.M., Fagerness A.J.*: Performance and Repair of Ultra-Thin Whitetopping: the Minnesota Experience. Transportation Research Board 81st Annual Meeting, Washington D.C. 2002
- [39] Full-Scale Accelerated Testing of Ultra-Thin Whitetopping Pavements. Tech Brief, Publication No. FHWA-RD-99-087, Federal Highway Administration, Virginia 1999
- [40] *Rajan S., Olek J., Robertson T.L., Galal K., Nantung T., Weiss W.J.*: Analysis of Performance of Ultra-Thin Whitetopping Subjected to Slow Moving Loads in an Accelerated Pavement Testing Facility. 7th International Conference on Concrete Pavement, Orlando 2001
- [41] *Chausson H., Granju J.L.*: Optimized Design of Fiber Reinforced Thin Bonded Overlays. Int. Symp. Brittle Matrix Composites 5, ed. by A.M. Brandt, V.C. Li, I.H. Marshall, BIGRAF and Woodhead Publ. Ltd, 133-142, Warsaw 1997
- [42] *Granju J.L., Pigeon M., Grandhaie F., Banthia N.*: Pavements Repairs with Metallic Glass Fiber Reinforced Concrete: Laboratory and Field Studies of Durability. ACI International Conference on Evaluation and Rehabilitation of Concrete Structure and Innovation in Design, 162-182, Hong Kong 1991
- [43] *Granju J.L., Grandhaie F.*: Thin Repairs with Metallic Fiber Reinforced Concrete: Length Changes during the First 24 Hours. 4th RILEM International Symposium on Fiber Reinforced Cement and Concrete, 676-689, Sheffield 1992
- [44] *Faleńska M., Gajger W.*: Wzmocnienie wyeksploatowanych nawierzchni asfaltowych przy wykorzystaniu nakładki z betonu cementowego. VII Międzynarodowa Konferencja "Trwałe i Bezpieczne Nawierzchnie Drogowe, 43-50, Kielce 2001
- [45] *Suh Y-C., Lundy J.R., McCullough B.F., Fowler D.W.*: A Summary of Studies of Bonded Concrete Overlays, Research Report 457-5F. Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, 1988

THIN BONDED CONCRETE OVERLAYS FOR STRENGTHENING OF ROAD PAVEMENTS - PART I

Abstract

The first part of the paper describes the technology that is used over the world for the pavement rehabilitation-the strengthening of existing pavements with thin bonded concrete overlays.

On the basis of the review of numerous case studies the experience gained during observation of overlays on concrete and asphalt substrate is presented.

The factors that affect the performance of concrete overlays and recommended procedures for design and construction of these overlays are also discussed.

In the following part of the paper full scale tests of thin bonded concrete overlays will be presented.

PODZIĘKOWANIA

Niniejsza praca powstała w ramach Projektu Badawczego KBN nr 7 T07E 033 15.