

ANDRZEJ SERUGA*, TERESA SERUGA*, LECH JULISZEWSKI**

DYBLE W DROGOWYCH NAWIERZCHNIACH BETONOWYCH

DOWELS FOR CONCRETE PAVEMENT USE

Streszczenie

W artykule przedstawiono rolę dybli w nawierzchni betonowej. Szczególną uwagę poświęcono aspektowi trwałości oraz właściwej pracy w konstrukcji nawierzchni. Przytoczono wyniki badań odporności na korozję dybli z powłoką ze stopu cynku oraz wpływu rodzaju dybli na skuteczność przenoszenia obciążeń w łączonych nawierzchniach betonowych.

Słowa kluczowe: nawierzchnie betonowe, korozja dybli, nośność połączenia w nawierzchniach betonowych

Abstract

This paper summarizes the role of dowel for concrete pavement use. Special attention was given to aspects of durability and good performance of concrete pavement. The results of laboratory investigations dealing with the efficiency of corrosion protection of the carbon steel core of zinc alloy sleeve dowels were presented. Moreover the influence of dowels type for load transfer efficiency in jointed concrete pavements is also discussed.

Keywords: concrete pavement, dowels corrosion, LTE in jointed concrete pavements

* Dr hab. inż. Andrzej Seruga, prof. PK, dr inż. Teresa Seruga, Instytut Materiałów i Konstrukcji Budowlanych, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska.

** Mgr inż. Lech Juliszewski, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Obecnie w drogownictwie możemy ogólnie wyróżnić trzy typy konstrukcji nawierzchni: podatny, półsztywny oraz sztywny. Z technologicznego punktu widzenia podział ten oznacza zróżnicowanie materiałów wykonania warstw: podbudowy, wiążącej oraz nawierzchni. Z punktu widzenia typu pracy konstrukcji oznacza to zróżnicowanie odkształceń w procesie obciążenia (użytkowania). Nawierzchnie podatne cechują znacznie większe odkształcenia plastyczne niż nawierzchnie sztywne. Objawia się to między innymi poprzez powstawanie kolein oraz nierówności spowodowanych postojem pojazdów. Nawierzchnie sztywne betonowe nie wykazują takich tendencji, w związku z tym ich stosowanie jest szczególnie uzasadnione na drogach o wysokim obciążeniu ruchem (np. autostrady i drogi ekspresowe) oraz w miejscach, gdzie przewiduje się postój lub powolny ruch pojazdów o dużych obciążeniach na oś (np. pętle autobusowe, drogi dojazdowe do punktów ważenia pojazdów ciężarowych).

Możemy wyróżnić kilka podstawowych typów nawierzchni betonowych sztywnych:

- łączone nawierzchnie betonowe niedyblowane,
- łączone nawierzchnie betonowe dyblowane z kotwami,
- łączone nawierzchnie betonowe zbrojone ze szczelinami dyblowanymi,
- nawierzchnie betonowe zbrojone w sposób ciągły,
- nawierzchnie betonowe z włóknami rozproszonymi,
- nawierzchnie z betonu sprężonego,
- nawierzchnie prefabrykowane.

Historia budowy nawierzchni betonowych liczy już ponad 120 lat. Zmieniały się i zmieniają w dalszym ciągu materiały, technologia oraz sprzęt. W ślad za nieustającym postępem wykonawczym idzie ewolucja podejścia projektowego. W znacznie większym stopniu uwzględnia się dawniej pomijane własności mechaniczne konstrukcji nawierzchni betonowych.

2. Dyble w konstrukcji nawierzchni

Dyble mają postać prętów o gładkiej powierzchni, które to powszechnie lokalizowane są prostopadle do poprzecznych połączeń w nawierzchniach betonowych w celu przeniesienia części obciążeń pomiędzy sąsiadującymi płytami, przez to zmniejszenia naprężeń w płycie i jej ugięć, a co za tym idzie zmniejszenia zniszczeń nawierzchni. Dyble muszą umożliwiać przemieszczenie horyzontalne połączenia wynikające ze skurczu i termicznej rozszerzalności płyty.

Z technologicznego punktu widzenia praca dybla może przybrać dwie formy. Pierwszą z nich jest sztywne zamocowanie jednego z końców w płycie betonowej i umożliwienie drugiemu końcowi przesuwu wzdłuż osi w tulei wykonanej ze stali lub innych materiałów – przy czym zastosowanie tworzyw sztucznych do tego celu należy uznać za wymagające potwierdzenia trwałości i niezawodności pracy (szczeliny rozszerzania). Drugą formą, częściej spotykaną w praktyce wykonawczej podczas budowy nawierzchni drogowych, jest wbudowanie dybli bez wyróżniania utwierdzonego końca. Realizować można to poprzez wciskanie dybli w świeżo układaną nawierzchnię przy użyciu wibratorów lub układanie dybli na podpórkach – tzw. koszach. Osadzanie dybli z użyciem wibracji jest zazwyczaj stosowane podczas wykonywania dużych zakresów robót przez zespoły układające mieszankę betonową metodą ślizgową – bez zastosowania szalunków.

W dotychczasowej historii wykonywania nawierzchni betonowych większość dybli do nawierzchni produkowana była ze stali węglowej. Ich korozja może w znacznym stopniu obniżyć cechy użytkowe i przyspieszyć tempo powstawania zagrożeń prawidłowej pracy konstrukcji. Przykładowo w momencie rozpoczęcia korozji dybla w miejscu połączenia oraz jej postępu w głąb sąsiadujących płyt, dochodzi do powstania szczeliny pomiędzy betonem a dyblem, co powoduje zwiększenie efektywnej szerokości połączenia, zwiększenie ugięć i naprężeń (skutkujące szybszą akumulacją uszkodzeń zmęczeniowych) oraz zmniejszeniem zdolności do przenoszenia sił (łatwiejsze powstawanie zjawiska pompowania, większe prawdopodobieństwo utraty podparcia płyty na połączeniu, szybszy rozwój klawiszowania).

Drugi mechanizm zniszczeń związany z korozją występuje, gdy produkty korozji pęcznią wokół dybla, powodując wykruszanie betonu na połączeniu lub powstawanie albo propagację rys wewnątrz płyty.

Dyble zwyczajowo były pokrywane smarami, farbą, epoksydami lub plastikiem w celu zapobiegnięcia korozji. Skuteczność tych metod w dużym stopniu zależała od warunków środowiska, własności oraz trwałości powłok, metody wykonania oraz innych czynników. Mimo to te sposoby zabezpieczeń wielokrotnie okazały się zawodne w dłuższych okresach pracy (na przykład powyżej 20 lat) w miejscach, gdzie używano środków odładzających w zimowym utrzymaniu dróg.

W ostatnich latach zaczęto produkować dyble z użyciem materiałów odpornych na korozję i niekorodujących, takich jak stal nierdzewna, oraz kompozytów w matrycy żywicznej (FRP), jednak te materiały mają również pewne wady i ograniczenia.

Dyble polimerowe zbrojone włóknami również są przeważnie traktowane jako eksperymentalne rozwiązanie dybli w nawierzchniach betonowych, pomimo tego produkty z rodziny FRP zaczynają być coraz szerzej akceptowane do użytku w konstrukcjach zbrojonych płyt mostowych. Niższa sztywność produktów wykonanych z FRP w nawierzchniach betonowych jest powiązana z niższą zdolnością początkową i długotrwałą do przenoszenia obciążeń, w związku z czym aby to zrekompensować, należy stosować większe średnice dybli lub zmniejszyć ich rozstaw. Pojawiły się również pytania dotyczące długotrwałej wydajności pracy takich produktów w obecności światła ultrafioletowego (podczas transportu, składowania, wbudowywania) oraz w środowiskach alkalicznych.

Dyble ze stali nierdzewnej przeważnie rekomendowane do zastosowań na autostradach (typ 316L) są bardzo drogie, kosztują kilka razy więcej niż typowe dyble z powłoką epoksydową. Rury ze stali nierdzewnej oraz dyble o przekrojach rurowych (zarówno puste, jak i wypełnione) są wyceniane bardziej korzystnie, lecz wciąż stanowią wysoki koszt i są traktowane eksperymentalnie przez niektóre agencje w związku z obawami o ich zachowanie i skuteczność konstrukcyjną.

3. Projektowanie dybli

Właściwa praca oraz żywotność dyblowanej nawierzchni betonowej zależy od spełnienia wielu wymagań projektowych, technologicznych, wykonawczych oraz eksploatacyjnych. Na etapie projektowania wyznacza się grubość poszczególnych warstw, wielkość płyt nawierzchni, sposób połączenia płyt, typ podłoża, ustala się wymagania odnośnie do mieszanki betonowej oraz sposób realizacji odwodnienia konstrukcji nawierzchni.

Podstawowe rodzaje i zasady dyblowania szczelin przedstawiono na rysunkach w załączniku B normy [1] i w zaleceniach technologicznych Katalogu [2]. Szczegóły montażu dybli

opisuje A. Szydło w pracy [3]. W opracowaniu tym podano wymagania polskie i zagraniczne dotyczące dybli.

Przy projektowaniu połączeń dyblowanych nawierzchni betonowych należy wyróżnić trzy grupy zagadnień wpływających na prawidłową ich pracę: cechy konstrukcyjne, trwałość oraz przyczepność do betonu.

3.1. Cechy konstrukcyjne

Kształt dybla – typ przekroju kołowy (najczęściej stosowany) lub owalny

Rozmiar – spotykane są średnice przekroju z przedziału od 12 do 50 mm

Długość – nie powinna być mniejsza niż 16–20 średnic przekroju

Rozstaw – od 0,25 do 0,75 m

Lokalizacja oraz rozstaw dybli są projektowane ze względu na wartość oraz umiejscowienie obciążenia, geometrię płyty i ograniczenie naprężeń dociskowych w betonie. Dyble zwyczajowo umieszcza się w połowie wysokości płyty, orientując je równolegle do siebie w kierunku zgodnym z kierunkiem ruchu pojazdów. W tabeli 1 zamieszczono zestawienie zmian wymagań stawianych dyblom według przepisów krajowych.

Tabela 1

Zestawienie polskich wymagań dotyczących dybli

Parametr	Rok wydania przepisów		
	1975 [4], 1999 [1]	2001 [2]	2007 [5]
grubości płyt [m]	0,26–0,40	–	–
min. średnica dybli [mm]	32–45	20	16
długość dybli [m]	min. 0,52–0,80	0,50	wg rozporządzeń krajowych
rozstaw dybli [m]	0,30–0,50	max. 0,50	–
materiał dybli	stal St3S	stal St3S, stal St37	stal, wytrzymałość obliczeniowa dybli min. 250 MPa
powłoka	polimerowa	polimerowa, na całej długości dybla, grubość min. 0,3 mm	asfalt, folia z tworzywa sztucznego, średnia grubość $\leq 1,25$ mm, powłoka wykonana fabrycznie lub na miejscu budowy

Jeśli obciążenie ruchem drogowym przyłożone jest blisko połączenia płyt drogowych, obie płyty – obciążona i nieobciążona – uginają się. Część obciążeń przenosi się z płyty obciążonej na nieobciążoną. W rezultacie ugięcia i naprężenia w obciążonej płycie mogą być znacząco niższe, niż gdyby w miejscu połączonej płyty była wolna krawędź.

Skuteczność przenoszenia obciążeń przez połączenie (wartość redukcji naprężeń i ugięć krawędzi w wyniku obecności połączenia w porównaniu do wolnej krawędzi) podawana jest jako wskaźnik LTE opisywany następującą zależnością:

$$LTE = (d_u / d_l) \cdot 100\% \quad (1)$$

gdzie:

- d_l – maksymalne ugięcie obciążonej płyty w połączeniu,
- d_u – odpowiadające ugięcie nieobciążonej płyty w połączeniu.

Jeśli połączenie charakteryzuje się małą zdolnością przenoszenia obciążeń, to ugięcie nieobciążonej płyty jest znacznie mniejsze niż ugięcie obciążonej płyty w połączeniu i wskaźnik *LTE* jest bliski 0%. Jeśli zdolność przenoszenia obciążeń przez połączenie jest bardzo dobra, wtedy ugięcia po obu stronach połączenia są wirtualnie równe i wskaźnik *LTE* jest bliski osiągnięcia 100% [6].

3.2. Przyczepność dybla do betonu

Dyble muszą być produkowane i montowane w sposób umożliwiający otwieranie i zamknięcie połączeń płyt wraz z ich skracaniem się i rozszerzaniem. Zwykle osiąga się to przez względnie gładką powierzchnię dybla oraz ewentualne nałożenia środka antyadhezyjnego (smaru) przed betonowaniem. Pomimo tego, że większość dybli produkowana jest jako gładkie, niektóre z nich zawierają niewielkie wady związane z procesem produkcji, transportem i składowaniem itp., które wywołują w pewnym stopniu mechanizm zazębienia się z otaczającym betonem. Dodatkowo, beton łączy się lepiej z niektórymi powłokami dybli (np. plastik i epoksyd) niż z pozostałymi. Zatem w zależności od rodzaju dybli otrzymujemy różny stopień podatności na poślizg wzdłuż dybla.

Normy przewidują procedury badawcze mające na celu określenie wytrzymałości (odporności) na poślizg dybla zakotwionego w betonie wzdłuż jego osi (metoda *pull-out*). Dopuszczalny poziom naprężeń przyczepności akceptowany w wielu stanach USA wynosi 0,4 MPa. Aby spełnić to ograniczenie, większość dybli pokrywana jest różnymi smarami przed betonowaniem.

W przypadku stalowych dybli powlekanych stopem cynku wiadomo jest, że produkty korozji stopu cynku przedostają się do porowatej struktury betonu. Przyspieszone badania doświadczalne przeprowadzone na podobnie zabezpieczonych elementach w konstrukcjach mostowych przez Florida Department of Transportation wykazały, że produkty korozji stopu cynku nie wywołują szkodliwych efektów w powłoce cynkowej, jak również w otaczającym betonem [7]. Jeśli chodzi o wpływ powłoki ochronnej ze stopu cynku na skuteczność przenoszenia obciążeń przez połączenie, jak również na nośność dybli na wyciąganie, to zdaniem autorów pracy [7] mógłby być istotny, gdyby średnica dybla w połączeniu zmniejszyła się o więcej niż 0,5 mm. Takie zmniejszenie średnicy dybla w konstrukcji jest nieprawdopodobne z dwóch powodów:

- korozja cynku będzie skoncentrowana na powierzchniach najbliższych najbardziej eksploatowanej stali (końce dybla, które są najbardziej odległe od połączenia płyt),
- poziom aktywności korozyjnej w terenie będzie znacznie niższy i o wolniejszym tempie w porównaniu do ostrych warunków, jakie przyjmowane są w badaniach laboratoryjnych.

Badania przyczepności betonu do dybli z powłoką ze stopu cynku przeprowadzono na 6 dyblach [7]. Dwa dyble zostały posmarowane olejem przemysłowym o nazwie Complete Release #546, na kolejne dwa naniesiono smar o nazwie Molub-Alloy 860/220-2ES, a ostatnie dwa dyble pozostawiono bez dodatkowych zabiegów. Naprężenia ścinające wyliczone przez podzielenie maksymalnej siły wyciągającej przez powierzchnię zabetonowanego dybla

wynosiły odpowiednio dla wariantu pierwszego: 99,3 i 93,1 kPa, dla wariantu drugiego: 12 i 21 kPa oraz dla wariantu trzeciego: 309 i 236 kPa. Uzyskano zatem wartości znacznie poniżej granicznego naprężenia przyczepności wynoszącego 400 kPa.

3.3. Trwałość dybli

Dyble do nawierzchni betonowych w przeszłości wykonywane były na ogół ze stali, w związku z tym ich trwałość była w głównej mierze zależna od ich odporności na korozję. Dyble z kompozytów polimerowych (żywice wzmocnione włóknami) obecnie są stosowane w niektórych nawierzchniach betonowych. Ponieważ nie są one podatne na korozję, bada się ich podatność zarówno na agresję chemiczną środowiska, jak i na degradację w obecności promieni UV – które są wyznacznikami trwałości.

Mając na celu poszukiwanie optymalnych rozwiązań, umożliwiających uniknięcie uszkodzeń nawierzchni betonowych, spowodowanych korozją dybli, testowano w USA w połączeniach nawierzchni wiele różnych rodzajów dybli. Alternatywne rodzaje dybli są w całości konstruowane z nierdzewnych materiałów lub chronione różnego rodzaju nierdzewnymi powłokami zapobiegającymi korozji (innymi niż epoksydowe, stosowane na stalowych prętach w rozwiązaniu konwencjonalnym).

W wielu projektach [8, 9] badano oprócz rozwiązań alternatywnych także dyble konwencjonalne ze stali zwykłej z powłoką epoksydową, oceniając na ich tle kilkadziesiąt innych zróżnicowanych rozwiązań dybli. Stosowano średnice dybli: 25 mm (1.0 in), 32 mm (1.25 in), 38 mm (1.5 in), 44 mm (1.75 in), 48 mm (1.88 in), 51 mm (2.0 in). Jak wynika z zestawienia, najczęściej testowanym rozwiązaniem alternatywnym były kompozytowe dyble FRP różnych firm. Najczęściej stosowano dyble o średnicy 38 mm (1.5 in). Zarówno dyble w osłonce ze stali nierdzewnej, jak i tuleje ze stali nierdzewnej wypełnione zaczynem cementowym, testowano stosując trzy typy stali nierdzewnych (304, 304L i 316L), różniące się m.in. zawartością węgla i odpornością na korozję.

4. Rodzaje dybli

W badaniach doświadczalnych prezentowanych w pracach [8, 9] uwzględniono następujące typy dybli:

- dyble kompozytowe z polimeru ze zbrojeniem rozproszonym (FRP),
- tuleje kompozytowe z FRP wypełnione zaczynem cementowym,
- dyble pokryte plastikiem,
- dyble z prętów ze stali nierdzewnej,
- dyble w osłonce ze stali nierdzewnej,
- tuleje ze stali nierdzewnej, wypełnione zaczynem cementowym.

4.1. Dyble kompozytowe z polimeru ze zbrojeniem rozproszonym (FRP)

Najbardziej powszechnym typem dybli FRP są dyble kompozytowe, wykonane z żywicy poliestrowej, zbrojonej włóknem szklanym. Stosowane są także dyble winylowe i epoksydowe. Materiały te zazwyczaj otrzymuje się w procesie ciągłego prasowania, w którym elementy zbrojące umieszcza się najpierw w impregnującej kąpeli żywicznej, a następnie przeciąga się przez dyszę formującą, w której żywica jest utwardzana.

Podstawowymi zaletami dybli kompozytowych z FRP jest ich odporność na korozję, niewielka waga i sztywność, zbliżona do sztywności nawierzchni betonowych. Ostatnia z tych cech może obniżyć naprężenia krytyczne, powstające na powierzchni kontaktowej między dyblem a nawierzchnią betonową, które mogą doprowadzić do braku stabilności dybla i w konsekwencji obniżenia efektywności przenoszenia obciążenia LTE. Do niekorzystnych cech tych dybli należy zaliczyć zwiększone koszty początkowe i niższy moduł sprężystości.

W wyniku przeprowadzonych badań laboratoryjnych stwierdzono, że dyble kompozytowe z FRP wykazują większe ugięcia niż dyble stalowe konwencjonalne lub wykonane ze stali nierdzewnej. Ponadto analiza teoretyczna podatności dybli na zadane obciążenie wykazała, że ugięcie dybli kompozytowych z FRP jest około 1,6 razy większe niż dybli ze stali nierdzewnej. Wynika z tego wniosek, że aby osiągnąć porównywalne zachowanie się nawierzchni, należałoby zwiększyć średnicę dybli kompozytowych lub zmniejszyć ich rozstaw w połączeniu nawierzchni [8, 9].

Dalsze badania laboratoryjne dotyczące skuteczności przenoszenia obciążeń LTE dowiodły, że dyble kompozytowe o średnicy 44 mm w rozstawie 203 mm dały taki sam rezultat jak konwencjonalne dyble stalowe o średnicy 38 mm, rozmieszczone co 305 mm. Kolejne badania (1999 r.) wykazały, że w łączonych elementach próbnych pod obciążeniem cyklicznym dyble kompozytowe o średnicy 38 mm zachowały się tak samo, jak dyble stalowe o średnicy 25 mm. Inne badania (2004 r.) potwierdziły, że zgodnie z oczekiwaniami większe średnice dybli lub ich zagęszczenie poprawiły właściwości LTE.

Słabe charakterystyki podłoża fundamentowego skutkowały osiągnięciem gorszych niż pożądane wyników LTE w sekcjach eksperymentalnych [8, 9].

Po raz pierwszy dyble kompozytowe z FRP zastosowano do konstrukcji nawierzchni betonowych w latach 1983 i 1985. Okresowo prowadzone badania ugięć wykazały, że wskaźnik LTE kompozytowych dybli w połączeniu jest taki sam, a nawet większy niż w przypadku zastosowania konwencjonalnych dybli stalowych, także stosowanych w tych projektach badawczych. Rezultat $LTE = 70\%$ był jednak gorszy niż dla pozostałych typów użytych dybli. Po 15 latach użytkowania nawierzchni wyjęto pewną liczbę dybli kompozytowych FRP ze złączy poprzecznych i poddano wnikliwym badaniom, które nie wykazały żadnych śladów ich zużycia poza mechanicznymi.

4.2. Tuleje kompozytowe z FRP

Różnorodność zastosowań pełnych dybli kompozytowych FRP do przenoszenia obciążeń w połączeniach spowodowała ich rozwój i zastosowanie kolejnego alternatywnego rozwiązania dybli w postaci tulei kompozytowych FRP, wypełnionych zaczynem cementowym wysokiej wytrzymałości. Do produkcji tulei stosowane są takie same materiały jak w przypadku pełnych dybli FRP. Zaczyn cementowy ma za zadanie zwiększenie wytrzymałości i odporności na odkształcenia tulei. Zanotowano jednak pewne problemy z uzyskaniem poprawnego wypełnienia tulei zaczynem pod ciśnieniem.

Podstawowymi zaletami dybli przenoszących obciążenia w ten sposób jest taka sama jak w pełnych dyblach FRP odporność na korozję oraz niski koszt w porównaniu do pełnych dybli. Testy rozwojowe nawierzchni (2003 r.) zalecają stosowanie zarówno nowych jak i adaptowanych materiałów, oceniając jednocześnie, że tuleje z FRP o średnicy 50 mm wypełnione zaczynem cementowym są bardziej ekonomiczne i stanowią alternatywę dla dybli stalowych o średnicy 38 mm, pokrytych warstwą epoksydową.

4.3. Dyble pokryte plastikiem

Są to stalowe dyble pokryte cienką powłoką plastikową, najczęściej polietylenową, o grubości 0,5–0,8 mm. Pomiędzy pręt i powłokę często wprowadzany jest smar. Dyble tego typu są stosowane od lat 60., po wykonaniu eksperymentalnych nawierzchni betonowych z ich użyciem. Podstawowymi zaletami dybli jest niska cena i dobra odporność na korozję. Ponadto plastikowa osłonka skutecznie przeciwdziała przywieraniu dybla do betonu, wobec czego nie jest potrzebna taśma oddzielająca. Doświadczenia ze stosowania tego typu dybli są zróżnicowane. Publikacje sugerują, że właściwości nawierzchni betonowych z zastosowaniem dybli tego rodzaju są raczej dobre. W stanie Michigan po 10 latach użytkowania efektywność oceniano jako znakomitą, natomiast po 30 latach eksploatacji stwierdzono odspajanie się osłonek plastikowych od rdzeni dybli, podczas gdy dyble powlekane epoksydem były w kondycji bliskiej początkowej.

W ramach realizacji od 2000 roku Europejskiego Projektu Demonstracyjnego Michigan I–75 stosuje się dyble w osłonce polietylenowej, umieszczone w mniejszym rozstawie w paśmie ruchu oraz dla porównania dyble powlekane epoksydem w rozstawie co 305 mm. Pełne wyniki nie są jeszcze udostępnione, ale wiadomo już, że na obu odcinkach wartości *LTE* są poniżej 70%. W stanie Nowy Jork po 10 latach użytkowania łączonych nawierzchni betonowych z tymi dyblami nie zanotowano klawiszowania ani zarysowania połączeń. W stanie Ohio po 19 latach użytkowania nawierzchni stwierdzono mniejsze klawiszowanie niż w przypadku połączeń z dyblami bez powłoki.

4.4. Dyble pełne ze stali nierdzewnej

Dyble te charakteryzują się wysoką odpornością na korozję, wysoką wytrzymałością i sztywnością. Stale nierdzewne są stalami niskowęglowymi (zawartość węgla poniżej 1%), a zawierają wagowo co najmniej 10,5% chromu (FHWA, 2001). Dodatek chromu zapewnia utworzenie się na powierzchni dybla niewidocznej powłoki z tlenku chromu, która czyni ją pasywną i odporną na korozję. W procesie produkcyjnym stali nierdzewnych stosowane są w celu uzyskania specjalnych właściwości materiału stopy molibdenu, niklu i azotu. Wyróżnia się ponad 60 gatunków stali nierdzewnych, podzielonych na pięć klas: austenityczna, duplex (ferrytyczno-austenityczna), ferrytyczna, martenzytyczna i hartowana.

Do produkcji prętów zbrojeniowych najczęściej stosowane są stale nierdzewne austenityczne, o największej odporności na korozję, zawierające nikiel (8–25%) i podwyższoną ilość chromu (17–25%). W celu zwiększenia odporności na korozję dodawany jest także molibden (do 7%). Stale nierdzewne nie mają zdolności magnetycznych i charakteryzują się nadzwyczajną odpornością na wysokie i niskie temperatury. W USA do zbrojenia konstrukcji najczęściej stosowana jest stal typu 304 lub 304L (z mniejszą zawartością węgla). Do produkcji dybli z prętów klasy 40, 60 i 75 (odpowiadająca minimalna granica plastyczności 300, 420 i 520 MPa) stosowane są stale typu 316 (o podwyższonej odporności na korozję) i 316 L (jak 316, lecz z mniejszą zawartością węgla). Koszt dybli ze stali nierdzewnych jest wysoki, przewyższa około pięciokrotnie koszt standardowych dybli powlekanych epoksydem. Całkowite koszty powinny być jednak mniejsze, biorąc pod uwagę większą żywotność dybli ze stali nierdzewnych i dłuższy czas ich użytkowania.

4.5. Dyble w osłonkach ze stali nierdzewnej

Osłonka dybla, metalurgicznie z nim zespolona, wykonywana jest ze stali nierdzewnej, klasy odpowiadającej klasie dybla ze stali węglowej. W rezultacie złożonej struktury dyble takie posiadają właściwości mechaniczne stali węglowych i odporność korozyjną pełnych dybli ze stali nierdzewnej, od których są znacznie tańsze. Osłonka najczęściej wykonywana jest ze stali typu 316, a jej grubość zależy od średnicy dybla. W łączonych nawierzchniach betonowych na autostradach w USA najczęściej stosowane są dyble średnic 32 i 38 mm, a zatem grubość osłonek wynosi od 1,8 do 2,3 mm (grubość typowych osłonek epoksydowych wynosi od 0,2 do 0,3 mm). Naprężenie przyczepności pomiędzy rdzeniem stalowym a osłonką ze stali nierdzewnej oraz grubość tej osłonki zapewniają dużą sztywność elementu, co czyni go niepodatnym na uszkodzenia podczas transportu. Ponieważ odsłonięte końcówki dybli są podatne na korozję podczas transportu, należy je zabezpieczyć np. spawając blaszki ze stali nierdzewnej, dopasowując nierdzewne nasadki lub nakładając epoksydową masę uszczelniającą.

4.6. Tuleje ze stali nierdzewnej

Podobnie jak w przypadku tulei kompozytowych z FRP, tuleje ze stali nierdzewnej (najczęściej typu 316L) wypełnia się wysokiej wytrzymałości zaczynem cementowym, zapewniającym całym elementom sztywność i wytrzymałość.

Badania laboratoryjne dotyczące możliwości stosowania tulei ze stali nierdzewnej jako dybli były przeprowadzone przez FHWA w latach 80. Tuleje puste i tuleje wypełnione zaczynem poddawano cyklicznym obciążeniom o wartości 106,8 kN. W wyniku wykonanych badań stwierdzono [8, 9]:

- puste tuleje ze stali nierdzewnej ulegały zniszczeniu bezpośrednio po zadaniu obciążenia początkowego,
- tuleje wypełnione zaczynem cementowym (średnica zewnętrzna 42 mm przy grubościach ścianki 1,65 mm i 2,77 mm) ugięły się mniej niż pełne dyble ze stali nierdzewnej o średnicy 32 mm,
- tuleje ze stali nierdzewnej o większej grubości ścianki, wypełnione zaczynem cementowym, ugięły się o połowę mniej, niż tuleje o mniejszej grubości ścianki.

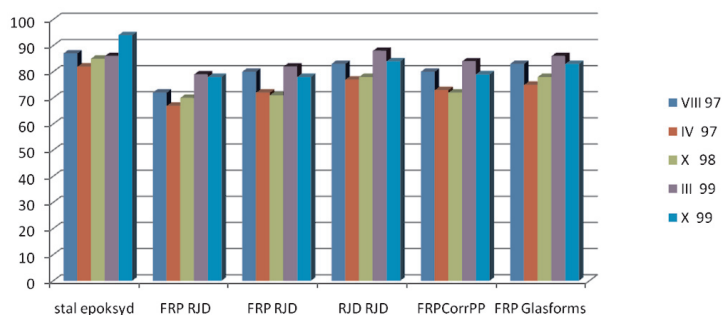
Wymienione dyble o różnych rozwiązaniach konstrukcyjnych zostały zastosowane przy realizacji kilkunastu doświadczalnych nawierzchni betonowych w ramach projektu FHWA TE 30. Piętnaście odcinków próbnych zlokalizowano w stanach: Illinois, Iowa, Kansas, Michigan, Minnesota, Ohio, West Virginia i Wisconsin. Podstawowym celem badań było określenie skuteczności przenoszenia obciążenia w połączeniach poprzecznych, przy wariantowych rozwiązaniach konstrukcyjnych. Opisy, zalety i wady oraz relacje cen alternatywnych rozwiązań dybli w odniesieniu do charakterystyk dybli konwencjonalnych podano tabeli 2.

Porównanie alternatywnych rozwiązań dybli z rozwiązaniem konwencjonalnym [8, 9]

Rodzaj materiału	Opis	Zalety	Wady
Stalowe pręty powleczone epoksydem	Pręt ze stali węglowej osłonięty dyfuzyjnie powłoką epoksydową (zwykle o grubości 0,2–0,3 mm) będącą barierą zatrzymującą wilgoć i chlorki	<ul style="list-style-type: none"> • odporność na korozję • wysoka wytrzymałość na rozciąganie • najtańsze ze wszystkich rodzajów prętów odpornych na korozję 	<ul style="list-style-type: none"> • długotrwała odporność na korozję może stanowić problem • osłonka wrażliwa na uszkodzenia podczas montażu • sztywność większa od sztywności betonu może powodować uszkodzenia powierzchni dybli
Stalowe pręty pokryte powłoką plastikową	Pręt ze stali węglowej powleczony cienką warstwą (około 0,5 mm) plastiku, np: polietylenu	<ul style="list-style-type: none"> • odporność na korozję • umiarkowana cena • brak przyczepności do betonu (nie wymaga stosowania pokryć zapobiegających przywieraniu) • zachowuje małą wytrzymałość na odrywanie 	<ul style="list-style-type: none"> • wrażliwość na uszkodzenia podczas transportu i montażu • sztywność większa od sztywności betonu może powodować uszkodzenia powierzchni dybli
Pręty ze stali węglowej z osłonką ze stali nierdzewnej	Oslonka ze stali nierdzewnej (najczęściej typu 316 i o grubości 1,8–2,3 mm) jest metalurgicznie połączona z konwencjonalnym rdzeniem ze stali węglowej	<ul style="list-style-type: none"> • silna odporność na korozję • trwałość • wysoka wytrzymałość na rozciąganie • długa żywotność (50–75 lat) • tańsze zarówno od dybli FRP, jak i pełnych ze stali nierdzewnej • specjalistyczny transport nie wymagany 	<ul style="list-style-type: none"> • droższe niż stalowe pręty powlekane epoksydowo (jednak nie tak drogie jak pełne ze stali nierdzewnej) • trudniejsze do transportowania niż pręty FRP • względnie wyższa sztywność niż prętów FRP
Pełne pręty ze stali nierdzewnej	Stale niskowęglowe (mniej niż 1% zawartości węgla) zawierające wagowo przynajmniej 10,5% chromu w celu zapewnienia odporności na korozję, typ 316 jest najczęściej stosowany w produkcji dybli	<ul style="list-style-type: none"> • silna odporność na korozję • trwałość • wysoka wytrzymałość na rozciąganie • długa żywotność (50–75 lat) • specjalistyczny transport nie jest wymagany 	<ul style="list-style-type: none"> • droższe niż stalowe pręty powlekane epoksydem • trudniejsze do transportowania niż pręty z FRP • relatywnie wyższa sztywność niż dybli FRP

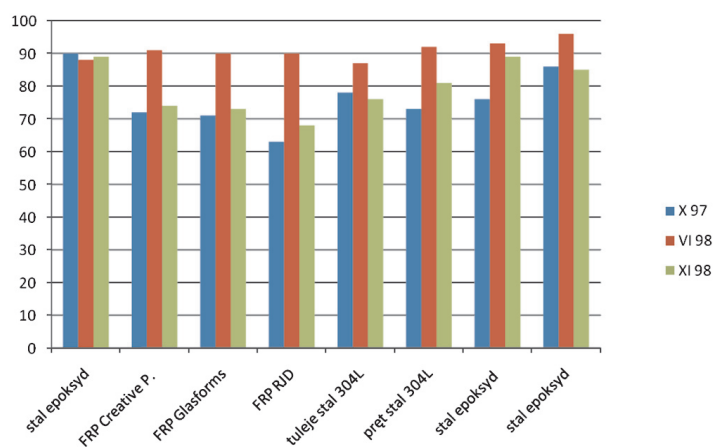
Tuleje ze stali nierdzewnej wypełnione zaczynem cementowym	Tuleja ze stali nierdzewnej wypełniona zaczynem cementowym wysokiej wytrzymałości w celu uzyskania odpowiedniej sztywności i nośności	<ul style="list-style-type: none"> • silna odporność na korozję • trwałość • wysoka wytrzymałość na rozciąganie • długa żywotność (50–75 lat) • tańsze zarówno od dybli FRP, jak i pełnościennych ze stali nierdzewnej • specjalistyczny transport nie jest wymagany 	<ul style="list-style-type: none"> • droższe niż stalowe pręty powlekane epoksydowo (jednak nie tak drogie jak pełne ze stali nierdzewnej) • trudniejsze do transportowania niż pręty FRP • wyższa sztywność niż prętów FRP
Kompozytowe pręty FRP	Pręt pełny wykonany z materiału kompozytowego zawierającego matrycę spoinową (jak: poliester, winyl, czy epoksyd), elementy zbrojące (jak: włókno szklane, lub węglowe) i wypełniacze	<ul style="list-style-type: none"> • niepodatność na korozję • trwałość • wysoka wytrzymałość na rozciąganie • mały ciężar/łatwość transportowania • ich sztywność jest relatywnie bliższa sztywności betonu niż prętów stalowych, co redukuje uszkodzenia powierzchni prętów 	<ul style="list-style-type: none"> • droższe niż stalowe pręty powlekane epoksydem • niższy moduł sprężystości i wytrzymałość na ścinanie niż stalowych prętów powlekanych epoksydem • mniejszy ciężar/gęstość (pręty niezabezpieczone mogą „wypływać” na powierzchnię podczas wibrowania)
Kompozytowe tuleje FRP wypełnione zaczynem cementowym	Tuleja kompozytowa z FRP, wypełniona zaczynem cementowym wysokiej wytrzymałości w celu uzyskania odpowiedniej sztywności i nośności	<ul style="list-style-type: none"> • niepodatność na korozję • trwałość • tańsze od pełnościennych prętów kompozytowych FRP • ich sztywność jest relatywnie bliższa sztywności betonu, niż prętów stalowych, co redukuje uszkodzenia powierzchni prętów 	<ul style="list-style-type: none"> • droższe niż stalowe pręty powlekane epoksydem • niższy moduł sprężystości i wytrzymałość na ścinanie niż stalowych prętów powlekanych epoksydem

Wartości *LTE*, otrzymane w wyniku przeprowadzonych badań w ramach projektu IL2 (Illinois) przedstawiono na rys. 1. Z przedstawionych danych wynika, że wartości *LTE* na odcinkach, na których zastosowano dyble w postaci prętów z kompozytów FRP, są niższe i bardziej zmienne niż na odcinkach próbnych, na których zastosowano konwencjonalne dyble z prętów stalowych z powłoką epoksydową.



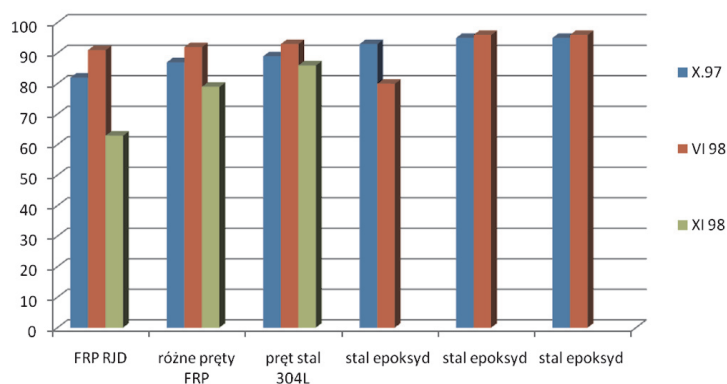
Rys. 1. Wyniki pomiarów wskaźnika LTE w ramach projektu IL 2, Gawedzinski 2000, wg [8, 9]

Fig. 1. The results of LTE measurements for IL 2 project, Gawedzinski 2000, wg [8, 9]



Rys. 2. Wyniki pomiarów wskaźnika LTE w ramach projektu WI 2, Smith 2002, wg [8, 9]

Fig. 2. The results of LTE measurements for WI 2 project, Smith 2002, wg [8, 9]



Rys. 3. Wyniki pomiarów wskaźnika LTE w ramach projektu WI 3, Smith 2002, wg [8, 9]

Fig. 3. The results of LTE measurements for WI 3 project, Smith 2002, wg [8, 9]

W stanie Wisconsin skonstruowano trzy doświadczalne nawierzchnie betonowe łączone, dyblowane. Dyble ze stali nierdzewnej 304L, wykonane z pełnych prętów, były rozmieszczone wariantowo po 3 lub 4 pręty w paśmie kół zewnętrznego pasa drogi. Pozostałe dyble, wykonane z prętów FRP oraz z tulei ze stali nierdzewnej 304L, wypełnionych zaczynem cementowym, rozmieszczono w normowym rozstawie co 305 mm.

Wskaźniki *LTE*, określone doświadczalnie po kilku latach eksploatacji drogi na odcinkach doświadczalnych WI2 i WI3, przedstawiono odpowiednio na rys. 2 i rys. 3. Wyniki badań przeprowadzonych w październiku 1997 r. i listopadzie 1998 r. wykazują znaczącą redukcję wskaźnika *LTE* wszystkich dybli wykonanych z prętów kompozytowych FRP. Wyniki otrzymane z badań przeprowadzonych w czerwcu 1998 r. nie wykazują istotnych różnic. Zdaniem autorów badań [8, 9], jak również autorów niniejszej pracy, fakt ten można uzasadnić większym udziałem mechanizmu ząbienia się kruszywa na skutek zamykania się połączeń poprzecznych w wyniku wyższych temperatur otoczenia.

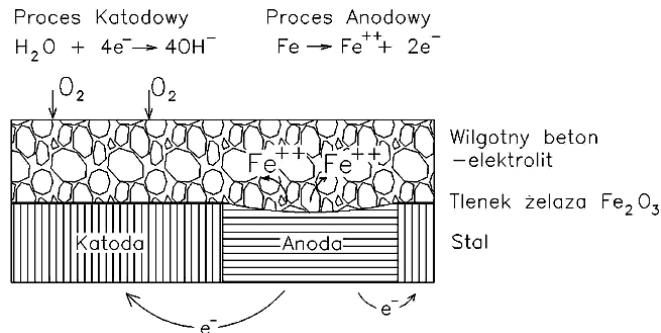
5. Proces korozji dybli stalowych

Według The National Association of Corrosion Engineers (USA) [7] korozja jest to zniszczenie i rozpad metalu lub stopu poprzez bezpośrednią agresję chemiczną lub elektrochemiczną. Korozja metalu jest więc zasadniczo powracaniem do niższego stanu energetycznego w postaci tlenków lub wodorotlenków. Stan metaliczny jest najwyższym możliwym stanem energetycznym dla większości metali, które – o ile to możliwe – naturalnie utleniają się w poszukiwaniu najniższego poziomu energii potencjalnej (potencjału energetycznego).

Warstewka ściśle przylegającego tlenku żelaza, produktu korozji, normalnie chroni stal zbrojeniową w betonie przed dalszym rozwojem korozji. To zjawisko czasem określane jest jako „pasywna ochrona naturalna” stali. Pierwszy krok w depasywacji stali ma miejsce, gdy względnie rozpuszczalne kryształy wodorotlenku wapnia, zwykle obecne w powierzchni kontaktowej zaczynu ze stalą, są rozkładane i usuwane. Pasywna warstewka tlenku żelaza, która jest termodynamicznie stabilna, przy poziomach pH powyżej 11 może ulec uszkodzeniu przez obniżoną kwasowość betonu lub może stać się przepuszczalna w obecności jonów chlorków. Usunięcie tej warstwy tlenku żelaza umożliwia rozpoczęcie procesu szkodliwej korozji. Korozja w obecności chlorków zwykle przebiega w znacznie szybszym tempie niż korozja będąca rezultatem obniżonej alkaliczności (np. karbonatyzacja) otaczającej mieszanki.

Szkodliwa korozja przebiega w postaci działania korozyjnego ogniwa elektrolitycznego składającego się z trzech elementów: katody, anody oraz elektrolitu. Anoda jest materiałem lub miejscem, w którym dochodzi do korozji poprzez utratę elektronów i utlenianie. Katoda jest materiałem lub miejscem, gdzie nadmiar elektronów z anody jest pochłaniany, a to pochłanianie określane jest jako redukcja metalu w tym miejscu. Elektrolit jest medium łączącym anodę z katodą, przewodząc prąd pomiędzy nimi.

Korozja stali zbrojeniowej w betonie występuje wtedy, gdy matryca betonowa pełni rolę elektrolitu, umożliwiając przepływ elektronów pomiędzy anodą i katodą. Anoda i katoda ogniwa elektrolitycznego mogą być oddzielnie zlokalizowane na tym samym pręcie lub mogą to być dwa pręty bądź dwa metale. Produkt reakcji wytworzony podczas korozji anody jest postacią tlenku żelaza, potocznie nazywaną rdzą. Rdza jest odpowiedzialna za wiele zniszczeń spowodowanych korozją, ponieważ jej tworzenie jest reakcją ekspansywną mogącą spowodować wykruszanie się betonu oraz zablokowanie połączenia dyblowanego. Ogólny mechanizm korozji stali jest zilustrowany na rys. 4.



Rys. 4. Elektrochemiczny proces korozji stali osadzonej w betonie [7]

Fig. 4. The electrochemical process of corrosion in concrete-embedded steel

Wolne jony chlorków są głównym czynnikiem mającym wpływ na korozję stali zbrojeniowej. W nawierzchniach betonowych źródłem chlorków mogą być środki odładzające oraz składniki mieszanki betonowej (np. kruszywo, cement, woda zarobowa, dodatki chemiczne). Jony chlorków, jeśli są obecne w odpowiedniej ilości, w obecności wilgoci i tlenu przyspieszają korozję. Korozja stali w betonie jest inicjowana, gdy koncentracja chlorków rozpuszczalnych w kwasie przekroczy 0,2%. Jeśli koncentracja chlorków jest odpowiednio wysoka, tworzy się chlorek żelaza (lub związki chlorków żelaza) i zastępuje ochronną warstwę tlenku żelaza normalnie obecną na stali zbrojeniowej. W związku z większą rozpuszczalnością chlorków niż tlenków, jony chlorków przemieszczają się od stali, odsłaniając czyste żelazo na działanie lokalnego środowiska korozyjnego oraz wywołując powstanie ogniwa elektrochemicznego.

Karbonatyzacja jest reakcją zachodzącą pomiędzy wodorotlenkiem wapnia w stwardniałym zaczynie cementowym i dwutlenkiem węgla obecnym w atmosferze. Reakcja, której produktami są węglan wapnia i woda, obniża pH betonu w związku z usuwaniem grupy hydroksylowej OH z roztworu wodnego zawartego w porach. Zaczyn cementowy ma pH o wartości co najmniej 12,5, a karbonatyzacja jest w stanie obniżyć pH nawet do 8 lub 9.

6. Wpływ korozji dybla na zachowanie się połączeń w nawierzchniach betonowych

Można wyróżnić dwie formy korozji dybla doprowadzające do rozwoju uszkodzeń nawierzchni betonowych:

- redukcja poprzecznego przekroju dybla w rejonie połączenia nawierzchni (środkowa część dybla),
- akumulacja ekspansywnych produktów korozji wzdłuż dybla prowadząca do zablokowania (zamknięcia) połączenia.

6.1. Redukcja poprzecznego przekroju dybla

Korozja środkowej części dybla jest przeważnie inicjowana w miejscu połączenia płyt, ponieważ jest to lokalizacja z najczęstszym dostępem tlenu, wody i chlorków. Dodatkowo powtarzalne ruchy płyt zazwyczaj uszkadzają powłokę ochronną właśnie w tej części dybla. Nie jest rzadkością stan dybli nawierzchniowych, których końce są niemal bez uszkodzeń podczas gdy przekrój pręta w części znajdującej się w najbliższym sąsiedztwie styku płyt uległ znacznemu zredukowaniu wskutek korozji, jak na rys. 5 [7]. Ta redukcja pola przekroju pręta może powodować uszkodzenia nawierzchni na co najmniej dwa różne sposoby.

Po pierwsze ubytek masy pręta powoduje powstanie wolnej przestrzeni pomiędzy dyblem a podpierającym betonem, co ogranicza skuteczność przenoszenia obciążeń pomiędzy płytami w miejscu połączenia. Aby zamknąć lukę i zainicjować pracę dybla, muszą wystąpić większe przemieszczenia płyty, jak również większe jej ugięcia (które mogą rozpocząć proces pompowania oraz klawiszowania) i wzrost naprężeń w płycie.

Ponadto, redukcja pola przekroju obniża sztywność połączenia płyt, w związku z czym obniża się również ich odporność na sfalowanie i spaczenie. Może to również wpłynąć niekorzystnie na część naprężeń w płycie oraz może zwiększyć ugięcia płyty.



Rys. 5. Widok dybla z powłoką epoksydową z nawierzchni w stanie Minnesota [7].

Fig. 5. View of epoxy-coated dowel retrieved from Minnesota pavement [7]

6.2. Zblokowanie połączenia (uciąglenie)

Zblokowanie połączenia następuje wskutek deponowania lub przyrostu ekspansywnych produktów korozji (m.in. tlenków żelaza, które zajmują objętości kilkakrotnie większe niż stal nieskorodowana) na długości wzdłuż obetonowanej części dybla.

Jedną z form uszkodzenia nawierzchni spowodowaną brakiem prawidłowo pracujących połączeń rozszerzania jest rozwarście sąsiadujących połączeń w nawierzchni (wraz z towarzyszącym uszkodzeniem wypełnienia uszczelniającego) i rys w połowie rozpiętości płyty (która następnie ulega niszczeniu wskutek dalszego wykruszania i klawiszowania).

Drugą formą uszkodzeń nawierzchni jest odłupywanie zblokowanego połączenia płyt, co jest związane z wytwarzaniem przez ekspansję produktów korozji wystarczającego ciśnienia (w połączeniu z naprężeniami rozciągającymi w płycie spowodowanymi jej skracaniem się), aby rozwarścić beton w płaszczyźnie dybla. Typowe dla tej formy uszkodzenia to spękane obszary betonu, widoczne pomiędzy połączeniem płyt a końcami dybli.

7. Zabezpieczenia przeciwkorozyjne dybli

7.1. Techniki ochronne

Najbardziej powszechną metodą redukcji stopnia korozji dybli jest stosowanie barier chroniących stal węglową dybli. Najbardziej popularnymi przykładami rozwiązań są oleje, smary, farby, epoksydy, plastiki i ostatnio dyble ze stali węglowej z osłonką ze stali

nierdzewnej oraz tuleje ze stali nierdzewnej. Oleje i smary używane były również jako środki poślizgowe w kombinacji z innymi materiałami ochronnymi. Produkuje się również dyble z powłokami epoksydowymi w osłonach (tulejach) ze stali nierdzewnej. Efektywność tych technik zwykle zmienia się z grubością i trwałością osłon. Grubsze i twardsze warstwy powłokowe będą bardziej odporne na uszkodzenie podczas transportu i wbudowania. Dyble ze stali nierdzewnej (typ 316L) mają wysoką odporność na korozję w miejscu połączenia płyt, lecz są drogie. Ponadto w USA odnotowano przypadki rozwoju korozji dybli powlekanych stalą nierdzewną podczas składowania na zewnątrz, najprawdopodobniej w związku z niewłaściwą grubością powłoki lub jej materiałem [7].

7.2. Dyble odporne na korozję i nierdzewne

Dyble obecnie są produkowane wyłącznie z użyciem materiałów, które są odporne na korozję bądź nierdzewne. Przykłady poprzednio stosowanych obejmują dyble wykonane w całości ze stali nierdzewnej oraz tuleje ze stali nierdzewnej (pustych w środku lub wypełnionych zaczynem cementowym lub uretanem). Następnie wprowadzano dyble FRP z tworzyw sztucznych (*Fiber Reinforced Polymer*) o pełnych przekrojach, jak i tuleje wypełnione zaczynem cementowym.

7.3. Ochrona katodowa [7]

Wyróżnia się dwie formy ochrony katodowej: wymuszonego obiegu oraz galwaniczna (tracona). Metody oparte na wymuszonym obiegu wymagają stałego zewnętrznego źródła energii (np. prostownik) w celu dostarczenia napięcia z zewnętrznej anody do korodującej stali zbrojeniowej. Te systemy wymagają zdalnych jednostek monitorujących, paneli kontrolnych, skomplikowanego okablowania w celu utrzymania przepływu napięcia dla efektywnej ochrony. Konieczne jest utrzymanie i dopasowywanie napięcia prostownika wraz ze zmieniającymi się warunkami w celu zapewnienia odpowiedniego poziomu ochrony stali.

Systemy galwaniczne wykorzystują właściwości elektryczne odmiennych metali, aby pasywnie chronić stal zbrojeniową. Katodowa ochrona galwaniczna jest zapewniona, gdy elektrony z ochronnej anody metalowej o stosunkowo wysokim potencjale elektrochemicznym (np. cynk) płyną w kierunku stali (katody) w obecności elektrolitu (np. beton nasycony chlorkami). Elektrony płyną w tym obiegu, dopóki nie zostanie osiągnięty stan elektrycznej równowagi.

Utrata elektronów z anody powoduje degradację tego metalu w czasie. Trwałość anody zmienia się wraz z przepływem prądu w obiegu i zależy od tempa ubytku anody dla dowolnego przepływu prądu. Tempo zużycia jest bezpośrednio proporcjonalne do różnicy potencjałów elektrochemicznych pomiędzy anodą i katodą ze stali węglowej oraz jest odwrotnie proporcjonalne do oporności obwodu ogniwa elektrochemicznego. Oporność betonu zależy od projektowanego składu mieszanki betonowej, warunków dojrzewania, wieku i zawartości chlorków.

Katodowa ochrona galwaniczna jest sposobem (środkiem), który wydaje się być najodpowiedniejszy do zastosowań w dyblach do nawierzchni, ponieważ nie jest kosztowny (bieżąca aktywność automatycznie dopasowuje się do zmieniających się warunków środowiskowych, by osiągnąć stan równowagi elektrycznej z zakotwioną stalą) i nie wymaga zewnętrznego źródła prądu.

8. Badania dybli z powłoką ochronną ze stopu cynku

Dybel o nazwie LifeJacket, chroniony warstwą ze stopu cynku, został opracowany przez Jarden Zinc Product Inc. Dybel ten jest produkowany przez mechaniczne zespolenie ciągłej warstwy stopu cynku o grubości 1,2 mm z typowym dyblem o średnicy 38 mm ze stali węglowej. Mechaniczne zespolenie uzyskuje się przez wciągnięcie rękawa ze stopu cynku na rdzeń ze stali węglowej. Grubość powłoki ze stopu cynku została tak dobrana, aby zapewnić ochronę katodową przez okres 100 lat (przy założeniu 90% ubytku powłoki cynkowej) w 5-procentowym roztworze solnym. Przyjęta grubość dostosowana została również do możliwości technologicznych związanych z procesem naciągania powłoki ochronnej.

Produkowany dybel jest podwójnie chroniony. Po pierwsze gruba warstwa powłoki cynkowej działa jako powierzchniowa bariera dla mechanizmów korozji. Ponieważ powłoka ze stopu cynku jest 5 do 7 razy grubsza od typowych powłok chroniących dyble i znacznie twardsza od powłok epoksydowych i plastikowych, jest znacznie odporniejsza na uszkodzenia powierzchni spowodowane zarysowaniem i zużyciem przez ścieranie. Poza tym stop cynku chroni katodowo odkrytą stal w wyniku naturalnej różnicy potencjałów elektrochemicznych cynku i stali.

W pracy [7] przedstawiono przebiegi i wyniki badań odporności na korozję przeprowadzonych na pięciu różnych typach dybli o porównywalnych rozmiarach: dybel LifeJacket, niezabezpieczony dybel ze stali węglowej, dybel ze stali węglowej pokryty zieloną powłoką epoksydową, dybel ze stali węglowej w rękawie ze stali nierdzewnej 316L oraz dybel mikrokompozytowy produkowany przez MMFX Inc. W dyblach z powłokami ochronnymi (LifeJacket, z powłoką epoksydową, i w rękawie ze stali nierdzewnej) nawiercono po 4 otwory symetrycznie rozmieszczone na obwodzie. Jeden z końców każdego dybla pozostawiono bez żadnego zabezpieczenia, aby umożliwić potencjalną korozję odsłoniętej stali. Do drugiego końca przyłączono miedziany przewód w celu pomiaru potencjałów elektrycznych półogniwa przed badaniami i w ich trakcie. Stal w sąsiedztwie przewodów została zabezpieczona epoksydem.

Plastikowe śruby przymocowano do każdego dybla w ten sposób, że łby śrub wystawały poniżej eksponowanego końca stali każdego dybla. Następnie próbki zanurzono na jednakową głębokość niezabezpieczonymi końcami w dół w szklanych zlewkach zawierających 5-procentowy roztwór chlorku sodu. Wystające końce plastikowych śrub miały na celu zapewnienie odstępu pomiędzy końcem dybla a dnem zlewki.

Badania były prowadzone przez 12 tygodni. Na końcu każdego tygodnia badano roztwór w każdej ze zlewek pod względem zawartości żelaza, używając atomowej spektroskopii absorpcyjnej. Roztwór spod dybli z powłoką ze stopu cynku badano również ze względu na zawartość jonów cynku. Na końcu każdego tygodnia całkowicie wymieniano roztwór w zlewkach.

Na rysunku 6 przedstawiono wyniki otrzymane za pomocą atomowej spektroskopii absorpcyjnej, szacujące tempo ubytku żelaza w okresie 12 tygodni. Można powiedzieć, że tempo rozwijającej się korozji jest stałe dla każdego rodzaju dybla w analizowanym czasie. Znaczne różnice widoczne są natomiast we względnym tempie rozwoju korozji. Stężenie żelaza pomierzone w pojemnikach zawierających dyble z powłoką ze stopu cynku było podobne do stężenia żelaza w wodzie wodociągowej.

Dyble z powłoką ze stali nierdzewnej korodowały w tempie od 5 do 6 razy większym niż dyble ze stali węglowej chronione powłokami epoksydowymi oraz od 250 do 400 razy szybciej niż dyble z powłoką ze stopu cynku. Z kolei tempo korozji dybli z powłoką epoksydową było od 40 do 90 razy większe niż w dyblach chronionych powłoką ze stopu cynku.

Jeśli chodzi o dyble ze stali węglowej z powłoką ze stali nierdzewnej, to w połączeniu tych metali ten o wyższym potencjale elektrycznym będzie pełnił rolę anody i będzie korodował w celu ochrony metalu o niższym potencjale. Stal węglowa ma wyższy potencjał i ona pełni rolę anody w połączeniu ze stalą nierdzewną. Tempo korozji tych dybli jest większe niż w przypadku dybli ze stali węglowej pokrytej powłoką epoksydową.

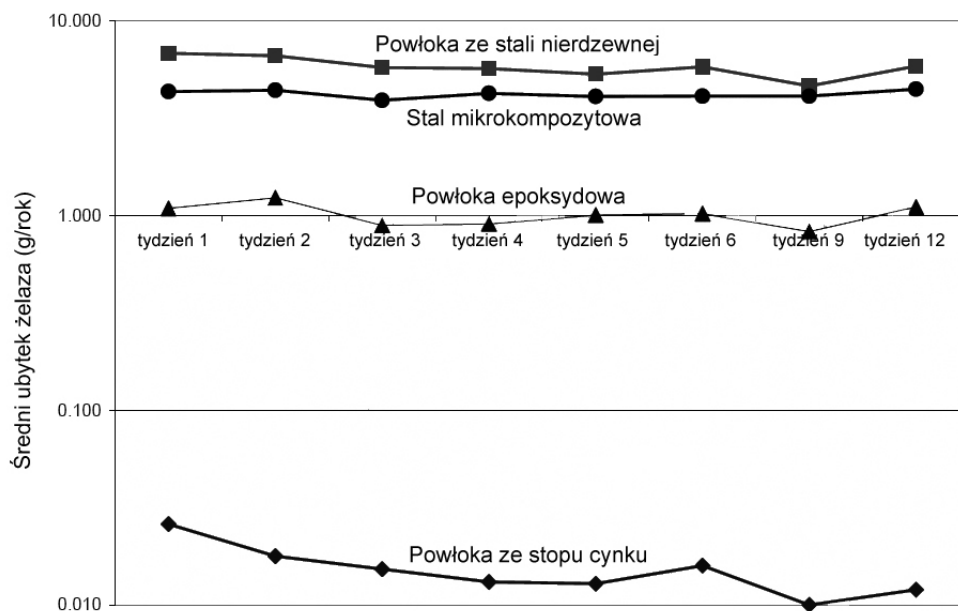
Tempo korozji dybli ze stali mikrokompozytowej było tylko nieznacznie niższe niż dla dybli z powłoką ze stali nierdzewnej. Należy podkreślić, że powierzchnia ekspozycyjna dybli ze stali mikrokompozytowej była znacznie większa niż w przypadku pozostałych dybli.

Badania uzupełniające przeprowadzono tylko na dyblach ze stali węglowej z powłoką ze stopu cynku. Celem badań było określenie skuteczności ochrony katodowej w zapobieganiu korozji stali przy dużych uszkodzeniach powłoki w środkowej części dybla. Na dwóch próbkach tego typu, w połowie ich długości wycięto powłokę ochronną na całym obwodzie. Na jednej próbce wykonano szczelinę o szerokości 3,2 mm i głębokości 1,3 mm, natomiast na drugiej próbce wykonano rowek o szerokości 25 mm i głębokości 6,4 mm. Badania próbek przeprowadzono w sposób analogiczny do poprzedniego. Po 12-tygodniowym okresie badań nie stwierdzono oznak korozji stali, a stężenie jonów żelaza w roztworze było podobne do obserwowanego poprzednio dla dybli z powłoką ze stopu cynku (rys. 7). Okazało się, że ochrona katodowa przewidziana w postaci rękawa ze stopu cynku jest w pełni efektywna w mostkowaniu dużych przerw w powłoce ochronnej i zapewnia całkowitą ochronę przeciwkorozyjną powlekanego stalowego dybla.

Ochrona rdzenia ze stali węglowej dybla LifeJacket jest częściowo realizowana przez korozję powłoki ze stopu cynku w najbliższej okolicy odsłoniętej stali. Tempa korozji stopu cynku były szacowane za pomocą atomowej absorpcji przez pomiar stężenia jonów cynku w roztworze chlorku sodu w okresie jednego tygodnia. Otrzymane wartości zostały przeliczone na szacunkową utratę grubości powłoki ze stopu cynku wyrażoną w mm/rok, przy założeniu warunków ekspozycji, jak w przeprowadzonych badaniach. Otrzymane wyniki przedstawiono na rys. 8 zarówno dla próbek z nawierconymi otworami, jak i dla próbki z obwodowym rowkiem szerokości 25 mm. Z przedstawionych wykresów wynika, że tempo ubytku cynku gwałtownie spadło w ciągu pierwszego tygodnia ze stosunkowo wysokich wartości 0,075–0,090 mm/rok do prawie stałego poziomu wynoszącego 0,0127 mm/rok. Wysokie tempo ubytku cynku w początkowej fazie odzwierciedla początkową aktywność pasywacyjną, podczas której na powierzchni odsłoniętej stali zostaje utworzona ochronna powłoka z węglanu cynku.

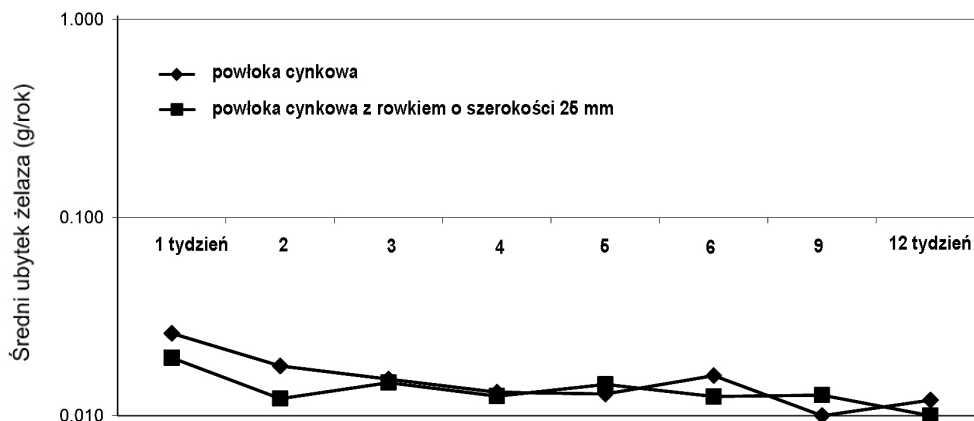
Przyjęte w badaniach doświadczalnych warunki oddziaływania chlorków i tempo ubytku cynku będą w rzeczywistości znacznie niższe. W konstrukcji betonowych nawierzchni łączonych, stal odsłonięta występuje tylko na końcach dybli, które znajdują się najdalej od źródła oddziaływania zarówno chlorków, jak i tlenu. Mało prawdopodobne jest również występowanie chlorków o tak silnym stężeniu i przez tak długi okres, jaki przyjęto w prowadzonych badaniach doświadczalnych.

W celu określenia skuteczności przenoszenia obciążenia przez połączenie nawierzchni dyblowanej z zastosowaniem dybli z powłoką ochronną ze stopu cynku, przeprowadzono przyspieszone badania obciążeniowe, wykorzystując w tym celu aparat typu Minne-ALF-2 [9]. Trzy dyble LifeJacket zostały wbudowane w ślad zewnętrznego koła na połączeniu pełnowymiarowych płyt betonowych. Obciążenie symulowało przejście pojedynczego koła o obciążeniu 40 kN z jednoczesnym pomiarem ugięć na obu stronach połączenia. Określona na podstawie pomierzonych ugięć wartość *LTE* wynosiła 80% po 4 milionach cykli obciążenia.



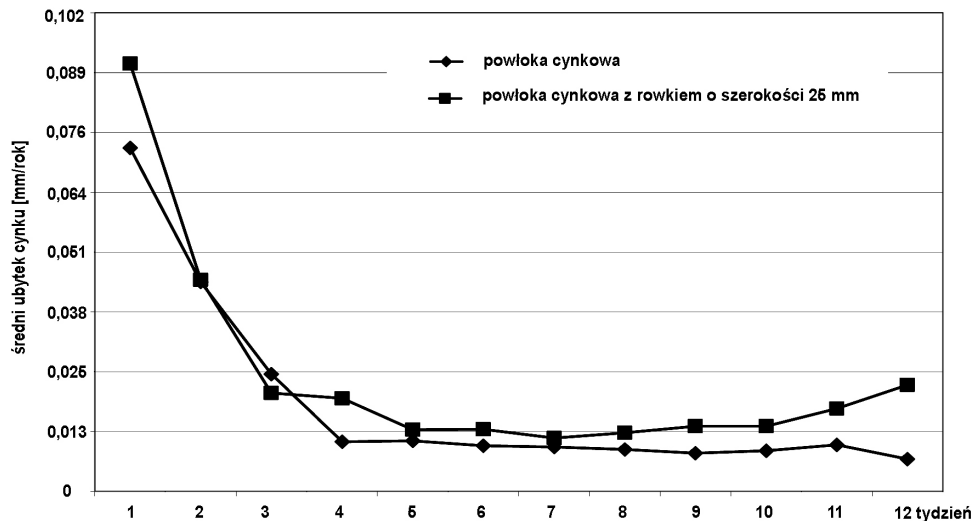
Rys. 6. Średnie tempo ubytku żelaza w wyniku korozji podczas badania dybli [7]

Fig. 6. Average rates of iron loss (corrosion) for test dowel



Rys. 7. Średnie tempo ubytku żelaza w wyniku korozji dybli z powłoką ze stopu cynku bez nacięcia rowka i z nacięciem

Fig. 7. Average rates of iron loss (corrosion) for zinc-sleeved dowels with and without cut slots



Rys. 8. Średnie tempo ubytku cynku w dyblach z powłoką ze stopu cynku

Fig. 8. Average rates of zinc loss for zinc-sleeved dowels

9. Wnioski

Jak wynika z przedstawionych w pracy danych, istnieją duże możliwości w doborze rodzaju dybli dla projektowanych łączonych nawierzchni betonowych. Przy wyborze właściwego rozwiązania należy uwzględnić projektowany okres eksploatacji nawierzchni, względy konstrukcyjne (ciężar dybli, łatwość wykonania, możliwość stosowania standardowych kołszy podtrzymujących dyble, metody spawania, konieczność smarowania dybli) oraz względy ekonomiczne (koszty zakupu, wykonania oraz koszty eksploatacyjne).

Na podstawie wyników otrzymanych z badań doświadczalnych zamieszczonych na rys. 1, 2 i 3 można stwierdzić, że wskaźniki *LTE* (skuteczności przenoszenia obciążenia) dla dybli wykonanych z prętów stalowych z powłoką epoksydową są najwyższe i najbardziej stabilne. Bez względu na okres prowadzonych badań doświadczalnych wskaźniki te zawierają się w przedziale 78–95%. Wskaźniki *LTE* dla dybli wykonanych z pełnych prętów ze stali nierdzewnej typu 304L zawierają się w przedziale 76–92%. Wskaźniki *LTE* dla dybli wykonanych z materiałów FRP w postaci prętów lub tulei wypełnionych zaczynem są najmniejsze, charakteryzują się dużą zmiennością i zawierają się w przedziale 62–82%.

Zaprezentowane w pracy wyniki pochodzą z badań doświadczalnych w różnych stanach w USA, na odcinkach nawierzchni wykonanych z betonu na różnych rodzajach kruszyw. Autorzy badań nie uściślili danych dotyczących rozstawu dybli, ich średnic i warunków środowiskowych (terenowych), które rzutują na wartość wskaźnika *LTE*. Można rozważyć, jaki jest rzeczywisty wpływ mechanizmu zazębiania się kruszywa w wyniku zamykania się połączeń poprzecznych przy wyższych temperaturach otoczenia. Na pewno jest on większy

w przypadku dybli wykonanych z materiałów FRP, co sugerowałoby występowanie mniejszych naprężeń przyczepności betonu do tych dybli. W okresie zimowym występują większe rozwarcia poprzecznych połączeń w nawierzchniach betonowych.

Wskaźnik *LTE* określony doświadczalnie w warunkach laboratoryjnych dla dybli wykonanych z prętów ze stali węglowej z powłoką ze stopu cynku wynosi 80%. Wskaźnik *LTE* dla dybli z prętów stalowych z plastikową powłoką określony po 5-letnim okresie eksploatacji wynosił 70%. Na niektórych odcinkach dróg po 19-letnim okresie eksploatacji stwierdzono mniejsze klawiszowanie połączeń niż w przypadku zastosowania dybli stalowych z powłoką epoksydową. Z kolei na innych odcinkach próbnych stwierdzono odpajanie się osłonki od rdzenia dybla po 30-letnim okresie eksploatacji. W świetle przytoczonych danych należy stwierdzić, że w naszym kraju powinno się podjąć stosowne decyzje w sprawie stosowania konkretnego typu dybli zapewniającego skuteczną pracę betonowych nawierzchni łączonych w określonym okresie użytkowania. Projektant nie może pozostawić wykonawcy swobody w sprawie wyboru rodzaju dybli.

Należy przypuszczać, że do nawierzchni o projektowanym okresie eksploatacji rzędu 20 lat, najbardziej efektywne będą stosowane powszechnie dyble ze stali węglowej z powłokami epoksydowymi (koszt około 5\$/szt.). w przypadku nawierzchni o znacznie dłuższym okresie przydatności eksploatacyjnej należy stosować dyble o najwyższej odporności na korozję. Doskonałą odporność na korozję mają dyble tulejowe ze stali nierdzewnej lub dyble z FRP, które wymagają innego sposobu montażu. Dyble ze stali węglowej z powłokami ze stopu cynku oraz ze stali nierdzewnej kształtują się podobnie cenowo, a mają również dobrą odporność na czynniki korozyjne. Można zatem wnioskować, że te cztery rodzaje dybli znajdują praktyczne zastosowanie (od 9\$ do 14\$/szt.). Dyble ze stali nierdzewnej są zbyt drogie (27\$/szt.), aby mogły być powszechnie stosowane.

Literatura

- [1] PN-V-83002 Lotniskowe nawierzchnie z betonu cementowego. Wymagania ogólne i metody badań, PKN, 1999.
- [2] *Katalog typowych konstrukcji nawierzchni sztywnych*, Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa 2001.
- [3] S z y d ł o A., *Nawierzchnie drogowe z betonu cementowego*, Polski Cement, Kraków 2004.
- [4] PN-75/S-96015 Drogowe i lotniskowe nawierzchnie z betonu cementowego.
- [5] PN-EN 13877-3 Nawierzchnie betonowe – Część 3: Wymagania dla dybli stosowanych w nawierzchniach drogowych betonowych, PKN, Warszawa 2007.
- [6] Seruga T., Seruga A., *Wybrane czynniki wpływające na konstruowanie łączonych nawierzchni betonowych*, Konferencja Dni Betonu, 2008, 753-762, również Geoinżynieria: Drogi, Mosty, Tunele, nr 1, 2009, 70-75.
- [7] S n y d e r M.B., *An Evaluation of Cathodically Protected Dowels for Concrete Pavements*, 8th International Conference on Concrete Pavements, Colorado Springs, USA, 2005, 392-414.

- [8] Larson R.M., Smith K.D., *Alternative Dowel Bars for Load Transfer in Jointed Concrete Pavements*, 8th International Conference on Concrete Pavements. Colorado Springs, USA, 2005, 415-438.
- [9] Seruga T., Seruga A., *Nowe rozwiązania dybli do betonowych nawierzchni łączonych w świetle badań doświadczalnych*, Drogi, nr 10, 2009, 25-35.
- [10] AASHTO T-253: *Standard method of test for coated dowel bars*.
- [11] Khazanovich L., Yut I., Tompkins D., Schultz A., *The second generation of Minnesota Accelerated Loading Facility-Minne-ALF-2*, Proceeding of the 8th International Conference on Concrete Pavements, Colorado Springs, USA, 2005, 1013-1029.