

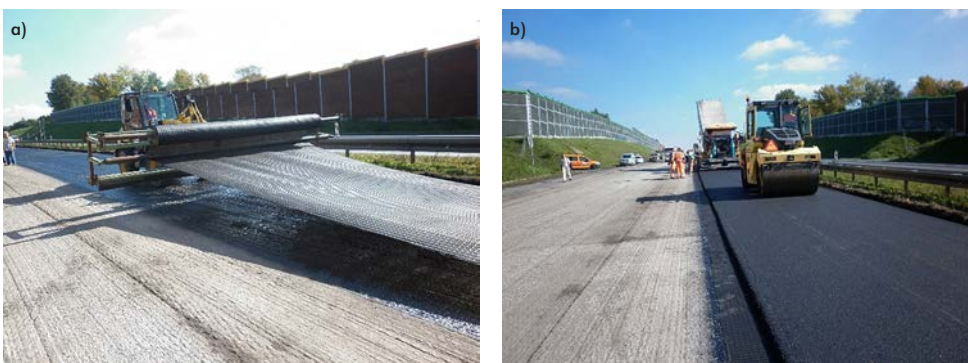
Badania wybranych mechanizmów działania zbrojenia geosyntetycznego w trwałych nawierzchniach asfaltowych

W artykule zostały podane niektóre wyniki badań dokumentujące ważne cechy zbrojeń z poliestru i poliwinylalkoholu w asfalcie. Badania te koncentrowały się na wzajemnych oddziaływaniach takich mechanizmów, jak: 1. charakterystyki zewnętrznych powierzchni produktów i ich wpływ na mobilizowaną siłę rozciągającą zbrojenie, 2. wydłużenie jednostkowe na spodzie zbrojonej nakładki asfaltowej w trakcie jej cyklicznego obciążania i jego wpływ na trwałość nawierzchni zbrojonej. Pomimo wieloletniej praktyki i licznych zastosowań nadal jest brak modeli teoretycznych opisujących kompleksowo mechanizm działania takiego zbrojenia ze względu na złożoność poszczególnych wpływów.

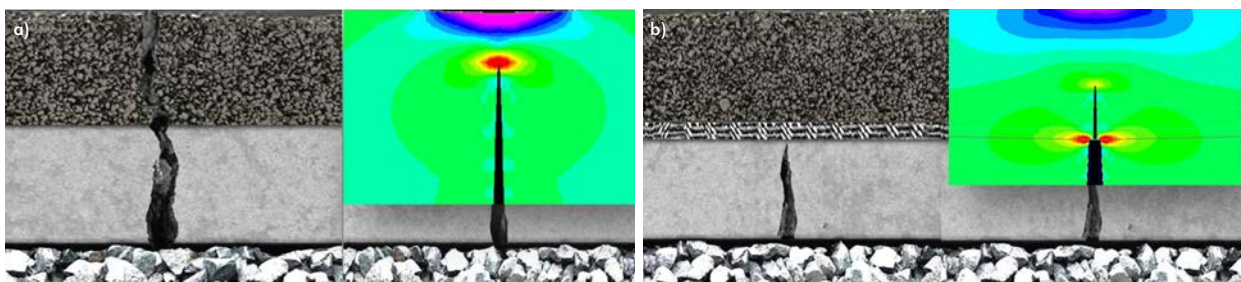
Od ponad 40 lat stosuje się różne produkty do zbrojenia nawierzchni asfaltowych. Ich zadaniem jest przedłużenie żywotności warstwy ścieralnej poprzez opóźnienie jej przebiccia i destrukcji spękaniami odbitymi. Obecnie oferuje się wiele produktów do zbrojenia pokryć asfaltowych, głównie siatek lub kompozytów wykonywanych z całej gamy materiałów, polimerów i włókien: poliester, polipropylen, poliwinylalkohol, włókna szklane, bazaltowe i węglowe, a nawet siatki ze stali. W zasadzie nie dyskutuje się w fachowej literaturze bardziej szczegółowo o przydatności danych siatek czy kompozytów dla zbrojenia asfaltu, pomimo znaczących różnic w ich właściwościach i różnic w przynoszonych lub spodziewanych efektach. W Polsce stosowanie zbrojeń asfaltowych rozpoczęło

ok. 25 lat temu, stosując początkowo głównie siatki z poliestru i polipropylenu. Obecnie są one stosowane powszechnie, nawet na drogach ekspresowych i autostradach. Na fot. 1 przedstawiono przykładowo instalację zbrojenia (geosiatką z poliestru) na autostradzie A4 z roku 2014.

Wydana przez IBDiM *Instrukcja - Zeszyt 66* [9] wychodzi naprzeciw problematyce zbrojenia pokryć asfaltowych, ale nie wszystkie zawarte w niej zalecenia autorzy referatu uważają za trafne lub ugruntowane praktyką bądź teorią. Nie podjęto jednak dalszych badań, tematyka ta w zasadzie nie wyszła poza zakres prac dyplomowych i doktorskich rozpraw, nie wnosząc ulepszonych lub nowych zasad czy też nowych metod doboru zbrojeń syntetycznych dla nawierzchni z betonu asfaltowego.



Fot. 1. Autostrada A4, odcinek Chorzów Batory – Kochłowice: a) instalacja zbrojenia (geosiatka poliestrowa), b) wbudowywanie i zagęszczanie nakładki asfaltowej (fot. Inora, 2014)



Rys. 1. MES – symulacja propagacji spękania w nawierzchni asfaltowej, a) pokrycie bez zbrojenia, b) ze zbrojeniem [12]

Destrukcje nawierzchni spowodowane spękaniami odbitymi

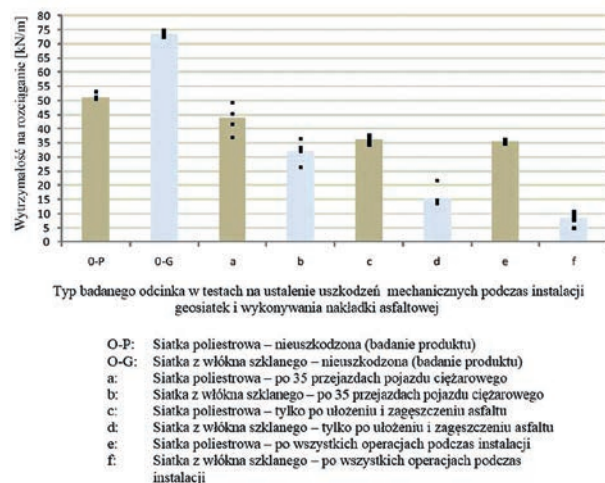
Spękania w nawierzchniach asfaltowych wywołane są głównie oddziaływaniami zewnętrznymi, obciążeniem od ruchu pojazdów i wahaniami temperatury. Wahania temperatury zarówno w cyklu dziennym, jak i sezonowym przy współdziałaniu cyklicznych naprężeń od ruchu pojazdów prowadzą do zmian starzeniowych bitumu, który staje się bardziej kruchy. W większości przypadków spękania zaczynają się od góry nawierzchni i propagują w dół warstw pokrywy drogowej. Przy stosunkowo słabym podłożu drogi spękania mogą propagować od dołu w górę, co spowodowane jest zbyt małą sztywnością podbudowy. Niemniej można skutecznie spowolnić propagację spękań, stosując odpowiednio dobrane zbrojenia. Takie zbrojenie zwiększa sztywność na rozciąganie pokrywy asfaltowej i przejmuje część naprężeń rozciągających, odciążając w ten sposób górną warstwę asfaltu, i rozpraszając te naprężenia na większą powierzchnię drogi (rys. 1).

Główne cechy zbrojenia dla betonu asfaltowego

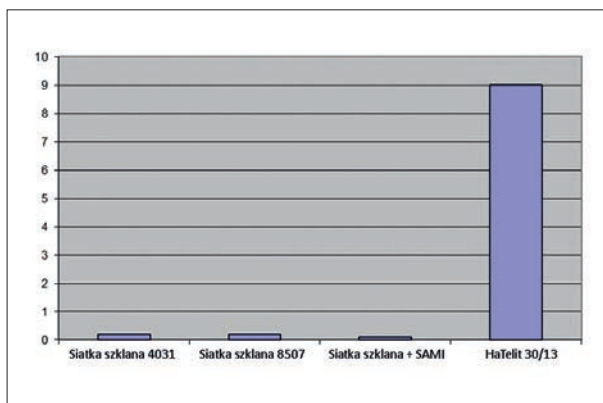
Mobilizacja sił rozciągających i uszkodzenia mechaniczne zbrojenia podczas instalacji

Badania wytrzymałościowe produktów do zbrojenia warstw asfaltowych wykonuje się standardowo według PN-EN ISO 10319:2015 [1], rozciągając próbki o szerokości 200 mm z prędkością 20%/min, a więc bada się te produkty w powietrzu, a nie po ich zabudowie w warstwie drogowej. Zakłada się dalej, że taką wytrzymałość i sztywność na rozciąganie będzie miał dany produkt także w asfalcie. Jednakże założenie to może być obarczone dużym błędem, ponieważ instalowane produkty ulegają znaczącej degradacji w trakcie wykonywania nakładki asfaltowej. Zatem takie badania powinny być również przeprowadzane na próbkach wyciągniętych ze świeżego, zagęszczonego betonu asfaltowego. Dlatego wyniki badań standardowych wykonanych na nienaruszonych produktach (w powietrzu) należy traktować jako wartości indeksowe, porównawcze, a nie decyzyjne. Sakou [11] przedstawił w swojej pracy dyplomowej wyniki badań poligonowych polegających na ustaleniu wytrzymałości na rozciąganie

próbek zbrojenia pobranych w trakcie instalacji i po wykonaniu nakładki asfaltowej. Testowano dwa produkty: geosiatki z włókna szklanego i poliestru. Przeprowadzoną symulację można traktować jako test w skali 1:1, ponieważ użyte maszyny i sprzęt nie odbiegały od tych stosowanych na drogach. Próbkę do badań wytrzymałościowych pobrane po zdjęciu wbudowanej i zagęszczonej walcem nakładki wykazywały dość spore uszkodzenia, zwłaszcza w przypadku próbek z włókna szklanego. Jako że było kilka poletek doświadczalnych, można było ustalić osobno: spadek wytrzymałości siatek po instalacji i 35-krotnym przejeździe samochodu ciężarowego, po wbudowaniu i zagęszczeniu nakładki (bez transportu po siatkach) i po wykonaniu wszystkich standardowych operacji: tzn. ułożenie siatki i transport po siatkach, wbudowanie mieszanki asfaltowej i jej zagęszczenie. Wyniki tych badań podano na rys. 2. Wykonane badania wykazały dobitnie, że w szczególności zbrojenia wykonane z włókien szklanych charakteryzują się dużą utratą wytrzymałości na skutek uszkodzeń mechanicznych powstających w trakcie instalacji tych produktów i wbudowywaniu nakładki asfaltowej. Potwierdza to tezę, że wartości wytrzymałości próbek fabrycznych należy traktować jako indeksowe, ponieważ w betonie asfaltowym zachodzi znaczna destrukcja wytrzymałości zbrojenia, a w szczególności siatek wykonanych z włókien szklanych.



Rys. 2. Wyniki poligonowych badań uszkodzeń zbrojenia, powstających w trakcie instalacji zbrojenia i wbudowania nakładki asfaltowej [11]



Rys. 3. Zastępcza sztywność szepności zbrojenia z asfaltem ($c_{eq,rf}$ [(N/mm²)/m] dla badanych produktów [2])

Nie tylko sama wytrzymałość i sztywność produktu na rozciąganie ma wpływ na efektywność zbrojenia asfaltu. Wiele badań wskazuje na to, że szepność zbrojenia z asfaltem (zazębienie się zbrojenia z betonem asfaltowym) ma bardzo duży wpływ na jego pracę w zbrojonej nakładce pod obciążeniem cyklicznym. Dlatego zachowanie się zbrojonej warstwy asfaltowej należy rozpatrywać jako kompozyt, składający się ze wzajemnie współpracujących elementów: betonu asfaltowego i zbrojenia. W ciągu ostatnich lat wykonano wiele badań z tego zakresu, między innymi z zastosowaniem siatek z wysoko modułowego poliestru. Głównym celem tych badań było możliwie dokładne (wierne) odtworzenie właściwości kompozytu w warunkach laboratoryjnych: beton asfaltowy – zbrojenie; ustalenie jego cech wspólnych i indywidualnych oraz zachowania się w normalnych warunkach obciążenia.

Sztywność szepności w kontakcie: zbrojenie/beton asfaltowy

Podobnie jak w żelbecie, tak i w zbrojonym asfalcie szepność w kontakcie zbrojenie/beton asfaltowy ma duży wpływ na cechy wytrzymałościowe kompozytu. Takimi badaniami zajął się De Bondt [2] i opublikował ich wyniki w pracy *Anti-Reflective Cracking Design of (Reinforced) Asphaltic Overlays*. De Bondt w trakcie 5-letnich badań wykonał poletka doświadczalne, stosując wiele dostępnych produktów stosowanych ówczesnie jako zbrojenia warstw asfaltowych. Udało się przy tym ustalić, że bardzo ważnym parametrem, mającym wpływ na efektywność zbrojenia betonu asfaltowego, ma sztywność szepności

w kontakcie zbrojenie/warstwa asfaltowa. Badania szepności przeprowadził on na pobranych rdzeniach z poletek doświadczalnych. Zdefiniował przy tym zastępczą sztywność tej szepności jako zmobilizowane naprężenia styczne do wzajemnego przesuwu (przemieszczenia) obu części rdzenia w mm, jednostką sztywności szepienia jest zatem: [(N/mm²)/mm]. Część tych wyników podano na rys. 3.

Wykorzystując MES-model, wykonał obliczenia wskaźnika wzmocnienia nawierzchni zbrojonej:

$$W_z = \frac{N_z}{N_w} \quad (1)$$

gdzie:

N_z – liczba cykli obciążenia nawierzchni zbrojonej do momentu przebicia się spękania;

N_w – liczba cykli obciążenia nawierzchni niezbrojonej do momentu przebicia się spękania.

Stosując dalej sztywność zbrojenia ($E \cdot A_{rf}$) i sztywność szepności $c_{eq,rf}$ dla produktu z poliestru o parametrach: ($E \cdot A_{rf}$) = 900 N/mm i $c_{eq,rf}$ = 9 [(N/mm²)/mm], otrzymał wskaźnik wzmocnienia $W_z = 3,5$, który ustalił, porównując liczbę cykli obciążenia uzyskaną na poletku bez zbrojenia. Z tych badań jasno wynika, że silna szepność zbrojenia i betonu asfaltowego ma znaczący wpływ na efekt wzmocnienia nawierzchni drogowej, tj. wydłużenie okresu jej eksploatacji. W tym konkretnym przypadku zarówno wysoka sztywność na rozciąganie poliestru, jak i wysoka szepność zbrojenia z asfaltem pozwoliła na prognozę wskaźnika wzmocnienia o wartości 3,5 (wydłużenie okresu eksploatacji zbrojonej nawierzchni 3,5 krotnie w stosunku do niezbrojonej).

Wytrzymałość na ścinanie w kontakcie: beton asfaltowy/zbrojenie

W trakcie wieloletniej praktyki w stosowaniu zbrojeń do betonu asfaltowego wypracowano kilka metod kontroli jakości robót, w tym także metodę badania wytrzymałości na ścinanie na próbkach rdzeniowych pobranych z nawierzchni w kontakcie: nakładka asfaltowa/zbrojenie, np. ZTV Asphalt-St [10], tzw. procedura Leutnera. W tej niemieckiej publikacji postawiono warunek, że wytrzymałość na ścinanie pomiędzy warstwą ścierną a warstwą wiążącą nie może być mniejsza niż 15 kN na rdzeniach o średnicy 150 mm.

| Temperatura [°C] | Rdzeń bez zbrojenia | | Rdzeń ze zbrojeniem | |
|------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|
| | Wartość średnia oporu ścinania [kN] | Wartość średnia przesuwu [mm] | Wartość średnia oporu ścinania [kN] | Wartość średnia przesuwu [mm] |
| 20,0 | 26,1 | 3,9 | 24,9 | 3,8 |

Tab. 1. Porównawcze zestawienie wyników badań na ścinanie na rdzeniach o średnicy 150 mm z nawierzchni zbrojonej geosiatką poliestrową i niezbrojonej, metoda Leutnera [7]

Na fot. 2 pokazano widok rdzenia po wykonaniu takich badań, a w tab. 1 przykładowe wyniki badań na rdzeniach pobranych z nawierzchni zbrojonych i bez zbrojenia na jednej z dróg w Niemczech. Zastosowana w tym przypadku siatka poliestrowa HaTelit® C 40/17 spełniała wymagania dotyczące wytrzymałości na ścinanie na styku: warstwa ścieralna – zbrojenie – warstwa wiążąca: ≥ 15 kN na rdzeniu 150 mm, co odpowiada naprężeniu ścinającemu: 0,85 MPa, ZTV Asphalt-StB 07/13, (2013) [10]. W polskich regulacjach z tego zakresu GDDKiA [8] wymaga się, żeby wytrzymałość na ścinanie na rdzeniu 150 mm była, jak następuje:

- kontakt: warstwa ścieralna – warstwa wiążąca: 1,0 MPa;
- kontakt: warstwa wiążąca – warstwa podbudowy: 0,7 MPa;
- kontakt: warstwa podbudowy – warstwa podbudowy: 0,6 MPa.

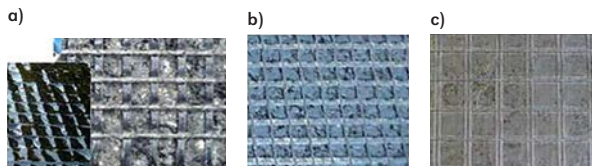
W odniesieniu do nakładek zbrojonych w zeszycie 66 IBDiM [9] zaleca się wytrzymałość na ścinanie w kontakcie: zbrojona nakładka – warstwa wiążąca: 1,3 MPa, co odpowiada oporowi na ścinanie na rdzeniu 150 mm: 22,96 kN. Zatem widać, że polskie wymagania w tym zakresie są znacznie wyższe niż niemieckie. W tym miejscu należy podkreślić, że poza badaniami na rdzeniach wymagane są: kontrola czystości i stanu nawierzchni przed opryskiem emulsją bitumiczną, kontrola ilości zużywanego emulsji (g/m^2), kontrola przyczepności zbrojenia do opryskanej nawierzchni, kontrola grubości nowej warstwy asfaltu i kontrola temperatury asfaltu w trakcie układania nakładki i jej zagęszczania walcami. Szczególną uwagę należy poświęcić fazie dowozu mieszanki asfaltowej i jej maszynowemu układaniu, nie dopuszcza się powstawania fałd, zagięć, przesuwania zbrojenia, bo wszystkie te niedopatrzienia mogą w znacznym stopniu obniżyć efektywność działania zbrojenia.

Spękania odbite w asfaltowych nakładkach zbrojonych

W najnowszych badaniach zajmowano się między innymi efektywnością zbrojenia pod kątem zastosowanego rodzaju surowca, wpływem wytrzymałości na rozciąganie i wpływem tekstury zbrojenia (ukształtowanie po-



Fot. 2. Widok rdzenia po badaniu metodą Leutnera, fot. Huesker



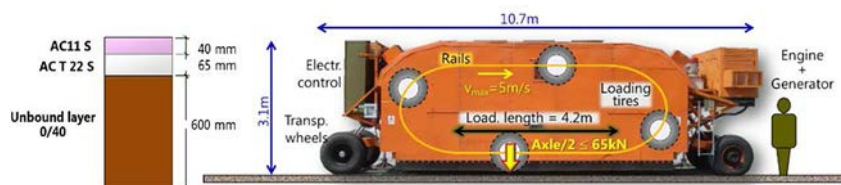
Fot. 3. a) siatka z włókna szklanego + SAMI, b) siatka z włókien szklanych i węglowych, c) siatka z włókien poliestrowych [3]

wierzchni, kształt oczek geosiatek, obecność wkładek z geowłókniny), zwracając szczególną uwagę na efektywność ząbienia się tych produktów z betonem asfaltowym. Testowano przy tym także kompozyty typu SAMI, (SAMI – ang. *stress absorbing membrane interlayer*).

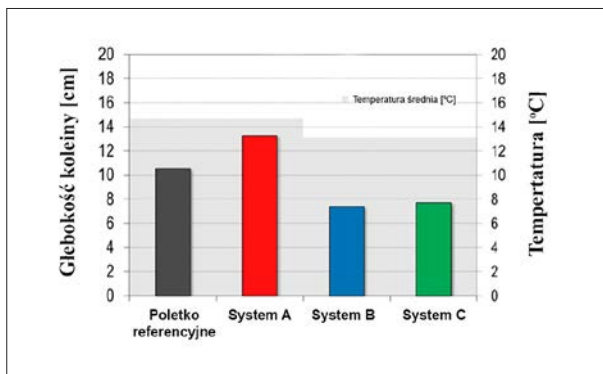
Badania w EMPA (2017) [3]

W badaniach tych starano się ustalić efektywność działania różnych produktów jako zbrojenia betonu asfaltowego, biorąc pod uwagę kilka często stosowanych w praktyce typów zbrojenia, fot. 3. Starano się przy tym ustalić ich wpływ na wydłużenie okresu eksploatacji zbrojonej nowej nakładki z betonu asfaltowego. Wykonano tu szereg badań zarówno laboratoryjnych, jak i polowych, zwracając szczególną uwagę na tempo propagacji rys odbitych w nowych nakładkach zbrojonych i szczepność między warstwą przed i po 300 000 cyklach obciążenia.

Na rys. 4 przedstawiono schematycznie konstrukcje testowanych nawierzchni i maszynę symulującą ruch pojazdów. Zarówno wyniki badań laboratoryjnych, jak i polowych wykazały, że zastosowane zbrojenia znacznie opóźniają czas przebicia się rys poprzez nowe zbrojone nakładki. Zanotowano również, że produkty bez



Rys. 4. Konstrukcja nawierzchni i urządzenie symulujące ruch pojazdów na poletku doświadczalnym, EMPA (2017) [3]
 AC 11 S; maks. ziarno 11 mm: warstwa ścieralna o grubości 40 mm
 Zbrojenie: Typ A, B, C i odcinek referencyjny bez zbrojenia
 ACT 22 S; maks. ziarno 22 mm: warstwa wiążąca o grubości 65 mm
 Unbound layer (maks. ziarno 40 mm): warstwa stabilizowana mechanicznie o grubości 600 mm
 Axle load: obciążenie na oś: 130 kN, tj. obciążenie na koło 65 kN



Rys. 5. Głębokości kolein na poletkach testowych po 300 000 przejazdach urządzenia testującego [3]

SAMI wykazują większą skuteczność w opóźnianiu się spēkań odbitych i tak zbrojone nakładki ulegają mniejszemu koleinowaniu.

Przykładowo na rys. 5. pokazano wyniki pomiarów głębokości koleiny na poletkach z systemami A, B, C i na poletku referencyjnym bez zbrojenia po 300 000 przejazdach koła testującego o nacisku 65 kN. Każdorazowo po 5k, 15k, 30k, 50k, 100k, 150k, 200k, 250k, 300k (k = 1000) przejazdach zatrzymywano urządzenie testujące (rys. 4) i na szerokości bazowej 600 mm dokonywano pomiaru kształtu koleiny. Najgorszy wynik uzyskano na poletku A2 (geosiatka z włókien szklanych o wytrzymałości na rozciąganie 100/100 kN/m na SAMI, na którym głębokość koleiny wynosiła 13 cm i była większa nawet niż na poletku bez zbrojenia. Lepsze i w zasadzie równoważne efekty uzyskano na poletkach B i C, na których głębokość koleiny osiągnęła około 8 cm. Należy jednak zauważyć, że w systemie B zastosowano siatki: włókno szklane + włókno węglowe o wytrzymałości na rozciąganie 250/120 kN/m, a na poletkach C siatki o wytrzymałości na rozciąganie 50/50 kN/m (system C1; siatki z poliestru, PET, system C2; siatki z poliwinylalkoholu, PVA). Wskazuje to, że podobne efekty wzmocnienia i poprawy trwałości nawierzchni można uzyskać, stosując znacznie tańsze wyroby z poliestru lub poliwinylalkoholu.

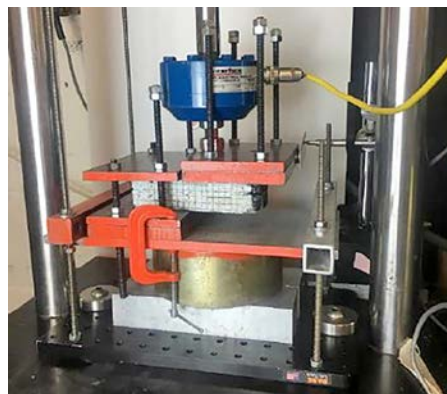
Badania w University of Texas [6]

Badania przeprowadzone w University of Texas zostały opublikowane przez Luminga w 2018 r. i były poświęcone kilku aspektom działania zbrojenia syntetycznego

| | Produkt 1 | Produkt 2 | Produkt 3 | Produkt 4 |
|------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Surowiec/włókna | PVA | PET | Szkoło | Szkoło |
| Wytrzymałość na rozciąganie [kN/m] | 50 | 50 | 50 | 100 |

Tab. 2. Produkty w testach na zmęczenie materiałowe (rozciąganie + ścinanie) [6]

na nośność i trwałość nakładek z betonu asfaltowego. Całość opracowania podzielono na trzy osobne części: I Przegląd literatury, II Badania nakładek ze zbrojonego betonu asfaltowego i III Badania wytrzymałości na ścinanie przy cyklicznym obciążeniu (wytrzymałość zmęczeniowa). W ramach części II wykonano badania eksperymentalne na próbkach zbrojonych nakładek. W badaniach tych zwrócono szczególną uwagę na tempo propagacji rys w trakcie cyklicznych badań wytrzymałościowych, polegających na wywoływaniu rozciągania i ścinania w zbrojonej nakładce asfaltowej, fot. 4.



Fot. 4. Stanowisko do badań zmęczeniowych zbrojonych próbek betonu asfaltowego [6]

Badane były przy tym cztery typy zbrojeń wykonane z: poliestru, włókna szklanego i poliwinylalkoholu. Każda próbka miała ten sam wymiar oczek i ten sam typ powleczenia włókien, tak aby zmniejszyć ilość zmiennych a skoncentrować się na skuteczności działania.

Badania te wykazały, że najbardziej odporne na zmęczenie były nakładki zbrojone włóknami PVA (poliwinylalkohol), nakładki zbrojone poliestrem (PET) nie odbiegały znacznie od tych zbrojonych PVA, natomiast nakładki zbrojone siatkami z włókien szklanych wyraźnie były mniej odporne na zmęczenie materiałowe [6].

Termiczna rozszerzalność liniowa zbrojenia syntetycznego i betonu asfaltowego

Zarówno zbrojenie, jak i matryca otulająca zbrojenie powinny mieć zbliżone charakterystyki termiczne, a więc zbliżone wartości rozszerzalności liniowej (tak jak to jest mniej więcej w żelbetonie). Zabezpiecza to przed ewentualnym rozluźnieniem szczypania się zbrojenia z betonem asfaltowym na skutek częstej zmiany temperatury w cyklu: dzień/noc a także rocznych zmian cykli termicznych. W tab. 3 podano wartości współczynników rozszerzalności liniowej dla niektórych materiałów stosowanych do zbrojenia betonu asfaltowego. Widać tu wyraźną przewagę włókien poliestrowych nad włóknami szklanymi, wyroby z poliestru będą w mniej-

| Kompozyt | Współczynnik rozszerzalności liniowej | Wskaźnik |
|-----------------------|---|----------|
| Beton/stal | $1,3 \times 10^{-5}/1,0 \times 10^{-5}$ | ~ 1 : 1 |
| Asfalt/poliester | $6,0 \times 10^{-4}/1,6 \times 10^{-4}$ | ~ 4 : 1 |
| Asfalt/włókno szklane | $6,0 \times 10^{-4}/4,5 \times 10^{-6}$ | ~ 130: 1 |

Tab. 3. Porównanie wartości współczynników termicznej rozszerzalności [12]

szym stopniu zakłócać wzajemne rozszerzanie się lub skurcz termiczny wywoływane zmianami temperatury nawierzchni.

Zmęczenie materiałowe zbrojonych nakładek asfaltowych

Zmęczeniowe spękania nakładek asfaltowych wynikają z propagacji rys i spękań z warstw podścielających, które doznają rozciągania w następstwie obciążeń cyklicznych lub zmian temperatury. Spękania odbite mogą być w znaczny sposób spowolnione poprzez ułożenie zbrojenia w kontakcie: nakładka/spękana konstrukcja drogi. Zjawisko to można ująć za pomocą modelu spękań zmęczeniowych - rys. 6 [5].

$$N_f = k_1 \cdot \left(\frac{1}{\epsilon_t}\right)^{k_2} \quad (2)$$

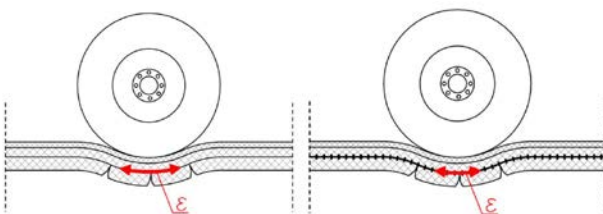
gdzie:

N_f - liczba cykli obciążenia wywołująca zniszczenie nawierzchni, tzn. przebiecie się rys przez nakładkę;

k_1 - współczynnik zmęczeniowy;

k_2 - wykładnik potęgowy funkcji zmęczeniowej;

ϵ_t - wydłużenie na spodzie nakładki [%].



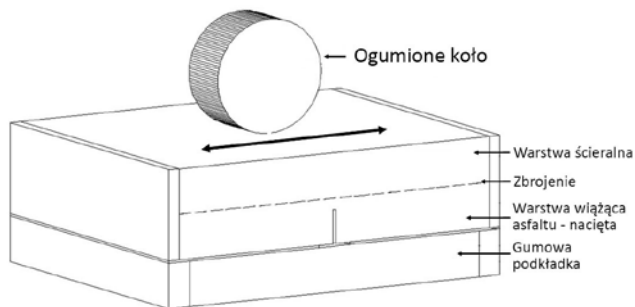
Rys. 6. Schematy modelu zmęczeniowego bez zbrojenia i ze zbrojeniem, Huang (1993) [12]

Na podstawie danych literaturowych Elsing i Horgan (2019) [12] zaproponowali przyjąć następujące wartości: $k_1 = 2,0 \cdot 10^{-12}$ $k_2 = 5,0$.

Przy odkształceniu pionowym równym 0,5 mm nakładka wytrzymuje $N_f = 2,00 \cdot 10^8$ cykli obciążenia a wydłużenie na spodzie nakładki wynosi $\epsilon = 0,000100\%$. Nawet nieznaczne zmniejszenie tego wydłużenia powoduje znaczące wzrosty liczby cykli obciążenia, jakie może przenieść nakładka, co pokazano w tab. 4, posługując się wskaźnikiem wzmocnienia.

Wpływ zbrojenia na wytrzymałość zmęczeniową nakładki asfaltowej

W swojej pracy dyplomowej zajmującej się zaletami zbrojeń w nakładkach asfaltowych Höpftner [4] wykorzystał specjalne stanowisko modelujące koleinowanie się nawierzchni drogowej. Celem tej pracy było ustalenie wpływu poszczególnych typów zbrojenia na redukcję deformacji nawierzchni zbrojonych. Konstrukcja modelu w dużym przybliżeniu pozwalała na wierne odtworzenie sytuacji drogowej. Odpowiednio nacięte warstwy asfaltu symulujące spękaną warstwę wiążącą zostały ułożone na podkładce z gumy, która miała odwzorowywać podatną podbudowę drogową, rys. 7. Następnie produkowano próbki, układając zbrojenie lub bez zbrojenia, przykrywając naciętą warstwę wiążącą warstwą ścierną, którą zagęszczano za pomocą małego walca.



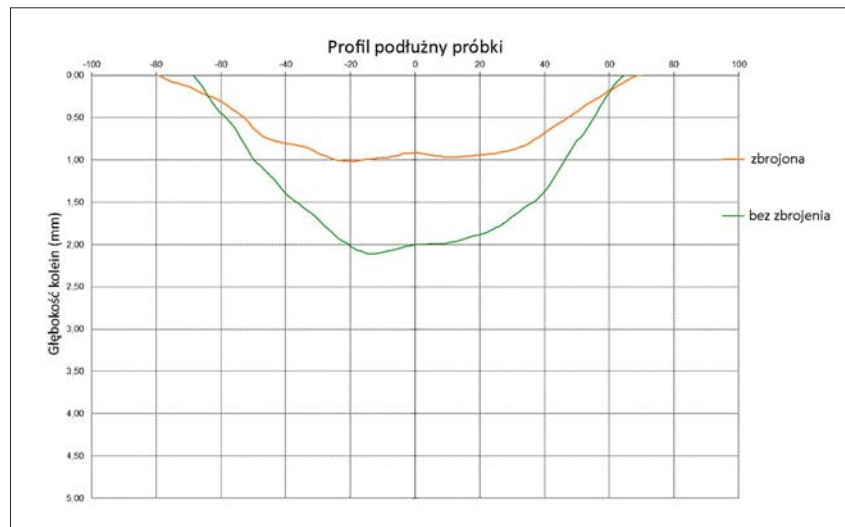
Rys. 7. Schemat urządzenia koleinującego model nawierzchni drogowej [4]

| Redukcja wydłużenia | Wydłużenie $[\epsilon_t]$ | Liczba cykli $[N_f]$ | Wskaźnik wzmocnienia |
|---------------------|---------------------------|----------------------|----------------------|
| Bazowa wartość | $\epsilon = 0,000100\%$ | $2,00 \times 10^8$ | 1,0 (wartość bazowa) |
| -5% | $\epsilon = 0,000095\%$ | $2,99 \times 10^8$ | 1,5 |
| -10% | $\epsilon = 0,000090\%$ | $3,99 \times 10^8$ | 2,0 |
| -20% | $\epsilon = 0,000080\%$ | $6,10 \times 10^8$ | 3,0 |

Tab. 4. Obliczona liczba cykli obciążenia, przy której następuje spękanie nawierzchni [12]



Fot. 5. Nacięte próbki warstwy wiążącej z naklejonym zbrojeniem [4]



Rys. 8. Przyrost pionowych deformacji nawierzchni zbrojonej siatką z poliestru pomiędzy 50 000 i 60 000 cyklami obciążenia ruchomego [4]

W próbkach zbrojonych przed ułożeniem geosiatek stosowano emulsję bitumiczną C67B4-OB w ilości zalecanej przez producenta danego produktu, fot. 5.

Urządzenie obciążające stanowiło koło ogumione o nacisku 700 N, co symulowało typowe obciążenie na oś równe 100 kN. Szczególną uwagę zwrócono na krzywą deformacji pionowych po 50 000 i 60 000 cyklach obciążania kołem, rys. 8. Na próbkach niezbrojonych przyrost deformacji pionowej na nawierzchni wynosił 2,1 mm, a na próbce zbrojonej siatką poliestrową już tylko 1,0 mm. Różnica ta wynika z lepszej zdolności nośnej próbek zbrojonych nad naciętą szczeliną w warstwie wiążącej niż nakładek bez zbrojenia.

Wnioski

Wielu badaczy wykazało, że zbrojenie asfaltu znacznie poprawia efektywność nakładek asfaltowych na spękanym nawierzchniach drogowych, a w szczególności dobrze działają materiały z poliestru i poliwinylalkoholu. Ustalono przy tym, że siatki z włókien szklanych mogą ulegać znaczącym uszkodzeniom w trakcie instalacji i wykazują mniejszą efektywność ze względu na ich mniejszą wytrzymałość zmęczeniową przy zginaniu i ścinaniu zbrojonych nakładek asfaltowych. Poza tym stwierdzono mniejszą szepność tych materiałów z betonem asfaltowym i niekorzystną ich wydłużalność termiczną w macrycy asfaltowej.

Do tej pory nie opracowano powszechnie akceptowanej i uznanej metody/procedury obliczeniowej, pozwalającej na bardziej ścisłe ustalenia dotyczące potrzebnej wytrzymałości i sztywności na rozciąganie zbrojenia, niezbędnej wartości szepnięcia się poszczególnych warstw i prognozy trwałości zbrojonych nawierzchni. Istnieje zatem nadal potrzeba opracowania odpowiednich mo-

deli obliczeniowych, pomimo ich złożoności, wielowarstwowej struktury i dużej liczby wpływów, jakie należy uwzględnić.

Obecne prognozy trwałości remontowanych dróg z zastosowaniem zbrojeń opierają się na badaniach i doświadczeniach zebranych przez producentów i instytucje naukowo-badawcze przez około 40 lat ich stosowania i mają głównie charakter empiryczny. □

Piśmiennictwo

1. International Organization for Standardization: *PN-EN ISO 10319:2015: Geosynthetics - Wide-width Tensile Test*.
2. De Bondt A.H.: *Anti-Reflective Cracking Design of (Reinforced) Asphaltic Overlays*. Ph.D.-thesis, Delft, Netherlands 1999.
3. EMPA: *Eidgenössische Materialprüfungsanstalt, Einsatz von Asphaltbewehrungen im Erhaltungsmanagement von Trag- und Deckschichten*. Application of Asphalt interlayers for road pavements, 2017.
4. Höptner A.: *Nachweis der Wirksamkeit von Asphaltbewehrungsgittern zur Verbinderung von Reflexionsrissen*. Diplom Thesis, Dresden 2010.
5. Huang Y.H.: *Pavement Analysis and Design*. New Jersey 1993.
6. Luming Y.: *A Study on Geosynthetic-Reinforced Asphalt Systems*. Ph.D.-thesis, University of Texas, Austin 2018.
7. RWTH, Aachen University: Certificate No. 1808991: *Testing of the layer bond of drill cores with and without reinforcement*. 2018.
8. GDDKiA: *Instrukcja laboratoryjnego badania szepności międzywarstwowej wg metody Leutnera próbek odwierconych z nawierzchni i wymagania techniczne szepności*. Wersja 30.11.2013.
9. IBDiM: *Zalecenia stosowania geowłóknin w warstwach asfaltowych nawierzchni drogowych*, „Zeszyt”, 66/2004.
10. ZTV Asphalt-StB 07/13, (2013): *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt*. FGSV, Ausgabe 2007, Fassung 2013.
11. Sakou L.: *Überprüfung der Wirksamkeit von Asphaltbewehrungssystemen unter Berücksichtigung der Einbaubedingungen*, Diploma Thesis, RWTH Aachen, Institute of Road and Traffic Engineering, 2011, maszynopis.
12. Elsing A., Horgan G.: *Determining key influence factors of durable asphalt reinforcement*. 18th LJMU Annual International Conference, 2019.