

## **Badania i analizy szczepności międzywarstwowej w nawierzchniach asfaltowych**

**Piotr Jaskuła**

*Katedra Inżynierii Drogowej, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska,  
e-mail: piotr.jaskula@wilis.pg.gda.pl*

**Streszczenie:** Referat zawiera opis prac badawczych szczepności międzywarstwowej warstw asfaltowych przeprowadzonych na Politechnice Gdańskiej. Badania wykonano w laboratorium i w terenie oraz wykonano analizy obliczeniowe konstrukcji nawierzchni, gdzie modelowano różną szczepność międzywarstwową. Prace laboratoryjne obejmowały badania szczepności z wykorzystaniem metody bezpośredniego ścinania, oceniające wpływ wybranych czynników na szczepność międzywarstwową: rodzaj i ilość emulsji, metoda i efektywność zagęszczenia, wrażliwość na zanieczyszczenia i wodę oraz powtarzalne obciążenie ścinające. Prace terenowe dotyczyły wpływu szczepności na ugięcia konstrukcji oraz sztywność warstw asfaltowych. W analizach badań terenowych uwzględniono także wpływ na szczepność międzywarstwową wskaźnika zagęszczenia warstw asfaltowych. Analizy obliczeniowe konstrukcji nawierzchni asfaltowych zawierały symulację szczepności międzywarstwowej przy wykorzystaniu modelu wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej oraz modeli kohezji, tarcia w metodzie elementów skończonych.

**Słowa kluczowe:** szczepność międzywarstwowa, warstwa szczepna, konstrukcja nawierzchni, ugięcia nawierzchni, wielowarstwowa półprzestrzeń sprężysta, MES

### **1. Wprowadzenie**

Szczepność międzywarstwowa w wielowarstwowej konstrukcji nawierzchni, a w szczególności pomiędzy warstwami asfaltowymi ma istotny wpływ na rozkład naprężeń i odkształceń w konstrukcji nawierzchni obciążonej ruchem samochodowym [1]. Brak lub niewystarczająca szczepność między warstwami asfaltowymi powoduje zwiększone ugięcia nawierzchni, te zaś generują zwiększone odkształcenia i naprężenia rozciągające na spodzie poszczególnych warstw. Przy nałożeniu się niekorzystnych warunków obciążenia i stanu konstrukcji mogą wystąpić przedwczesne strukturalne uszkodzenia w postaci spękań, prowadząc do skrócenia trwałości zmęczeniowej nawierzchni. Dla zapewnienia właściwego powiązania warstw asfaltowych powszechnie stosuje się warstwę szczepną z emulsji asfaltowej. Identyfikacja i zrozumienie czynników wpływających na właściwe zaprojektowanie oraz poprawne wykonanie warstwy szczepnej jest podstawowym elementem sukcesu w zakresie połączeń międzywarstwowych, które między innymi bada się przy wykorzystaniu aparatu do bezpośredniego ścinania opracowanego w Niemczech pod koniec lat 70 tych przez Leutnera [2]. Istnieją także inne metody laboratoryjnego badania szczepności międzywarstwowej, które omówiono w publikacjach [3], [4].

Z pośród wielu czynników wpływających na jakość połączenia międzywarstwowego zgodnie z opracowaniami [5], [6] decydujące znaczenie mają: rodzaj i ilość warstwy szczepnej, zagęszczenie stykających się warstw asfaltowych, a głównie warstwy wyżej leżącej. Wpływ rodzaju i ilości warstwy szczepnej na szczepność międzywarstwową opisano

w [3], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13]. Pozytywny wpływ właściwego zagęszczenia warstw asfaltowych na szepność przedstawiono w publikacjach [3], [14], [13]. Czynniki środowiskowe, jak obecność wody, zanieczyszczeń także oddziałują na siłę połączenia [6], [9], [15], [16]. Jakość powiązania warstw asfaltowych w terenie opisano w [13], [17], jak i wpływ odpowiedniego zagęszczenia warstw asfaltowych na połączenie międzywarstwowe przedstawiono w pracach [18], [19]. Natomiast wpływ szepności na ugięcia konstrukcji przedstawiono między innymi w pracach [13], [20], [21], [22]. Wyjaśnienie niektórych zachowań konstrukcji nawierzchni nie jest możliwe bez wykonania analiz obliczeniowych, gdzie można z większym lub mniejszym przybliżeniem zasymulować szepność międzywarstwową warstw konstrukcji nawierzchni [1], [19].

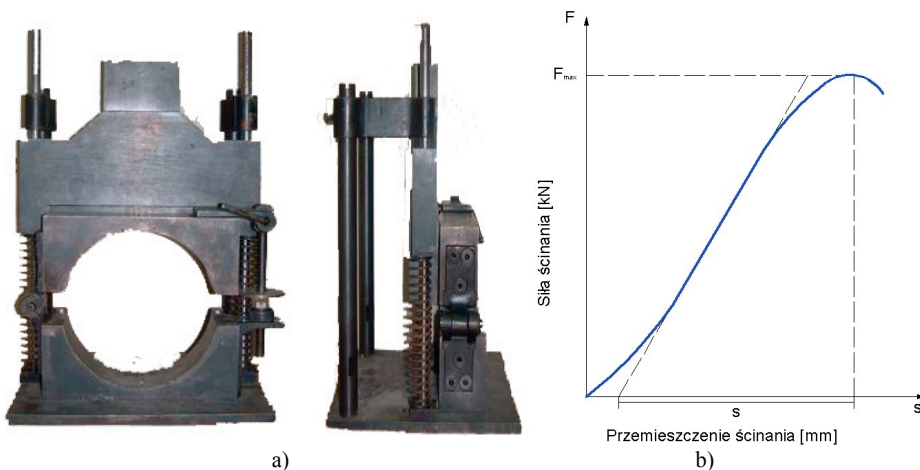
Artykuł przedstawia przegląd wyników badań z wielu projektów badawczych i badań własnych realizowanych w Katedrze Inżynierii Drogowej Politechniki Gdańskiej.

## 2. Badania laboratoryjne

### 2.1. Aparat ścinania bezpośredniego

W przedstawionych badaniach szepności międzywarstwowej wykorzystano metodę ścinania bezpośredniego zaproponowaną przez Leutnera w 1979 r. i opisaną w instrukcji [2]. Badanie ścinania bezpośredniego wg Leutnera polega na bezpośrednim, wolnym od momentów (na zginanie) przebiegu ścinania w płaszczyźnie połączenia międzywarstwowego, która jest granicą warstw asfaltowych rdzeni o średnicy 150 mm. W czasie badania mierzona jest siła ścinająca i przemieszczenie ścinania (patrz rys. 1b). Zniszczenie w ustalonej płaszczyźnie ścinania następuje z prędkością przesuwu tłoka równą 50,8 mm/min. Tak jak w oryginalnej procedurze badania odległość pomiędzy szczękami ścinającymi wynosi 0 mm. Próbki bezpośrednio przed badaniem kondycjonowano przez 12 godz. w suszarce z nawiewem powietrza w temperaturze +20°C.

Na podstawie pomierzonej maksymalnej siły ścinania i pola powierzchni styku warstw obliczano wytrzymałość na ścinanie, która jest miarą szepności międzywarstwowej podczas badań kontrolnych w Polsce.



Rys. 1. Widok a) aparat ścinania, b) wykres siły ścinającej w funkcji przemieszczenia ścinania w badaniu szepności międzywarstwowej



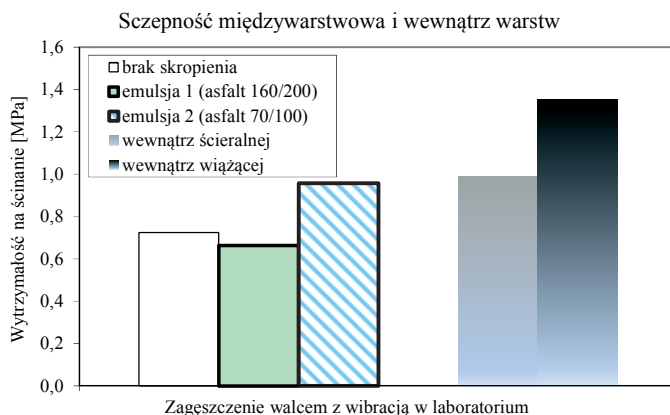
## 2.2. Materiał i przygotowanie próbek

W badaniach laboratoryjnych do oceny szczepności międzywarstwowej pomiędzy warstwami asfaltowymi wykorzystano dwuwarstwowe próbki z betonów asfaltowych formowanych w laboratorium. Ocenie poddano różne konfiguracje warstw szczepnych: brak skropienia, brak skropienia w technologii „gorące na gorące” oraz skropienie dwoma różnymi emulsjami asfaltowymi. Jedną z nich to emulsja produkowana na bazie asfaltu zwykłego 160/200 (emulsja 1), zwykle stosowana do 2006 roku przez wykonawców robót bitumicznych. Drugą to emulsja specjalnie dedykowana do skropień międzywarstwowych po wprowadzeniu normy PN-EN 13808, produkowana na bazie zwykłego asfaltu 70/100 (emulsja 2). Skropienie z emulsji stosowano w ilości 0,3-0,4 kg/m<sup>3</sup>.

Stosowano cztery metody zagęszczenia: małym walcem o masie 465 kg bez wibracji, małym walcem z wibracją, zagęszczarką wg normy PN-EN 12697-33 i prasą żyratorową wg normy PN-EN 12697-31. Walcem zagęszczano płyty o wymiarze 900 mm x 1200 mm w warstwach o wysokości: 6 cm dolna i 4 cm górna. Zagęszczarką zagęszczano płyty o wymiarze 305 mm x 305 mm w warstwach o tej samej wysokości co walec, czyli 6 i 4 cm. Natomiast w prasie żyratorowej zagęszczano próbki o średnicy 150 mm w warstwach o wysokości 10 cm, zarówno dolną i górną warstwę. Wszystkie próbki zagęszczano do osiągnięcia ustalonej wysokości i odpowiedniej gęstości objętościowej z badania Marshalla.

## 2.3. Wyniki szczepności międzywarstwowej

Na rys. 2 przedstawiono wyniki wytrzymałości na ścinanie pomiędzy warstwami ścierną i wiążącą przy zastosowaniu różnej warstwy szczepnej i wytrzymałości na ścinanie wewnątrz warstw. Można zaobserwować wyraźną korzyść z zastosowania emulsji z asfaltem 70/100, jak i nieznaczne pogorszenie szczepności przy zastosowaniu emulsji z asfaltem 160/200 w odniesieniu do połączenia, gdzie nie zastosowano skropienia. Jednocześnie widać, że zastosowanie właściwej emulsji, specjalnie dedykowanej do skropień międzywarstwowych, wyprodukowanej na bazie asfaltu 70/100 umożliwia uzyskanie wytrzymałości na ścinanie połączenia międzywarstwowego na poziomie zbliżonym jak uzyskuje jedna z warstw połączonych (ścierną); ścinana wewnątrz warstwy.

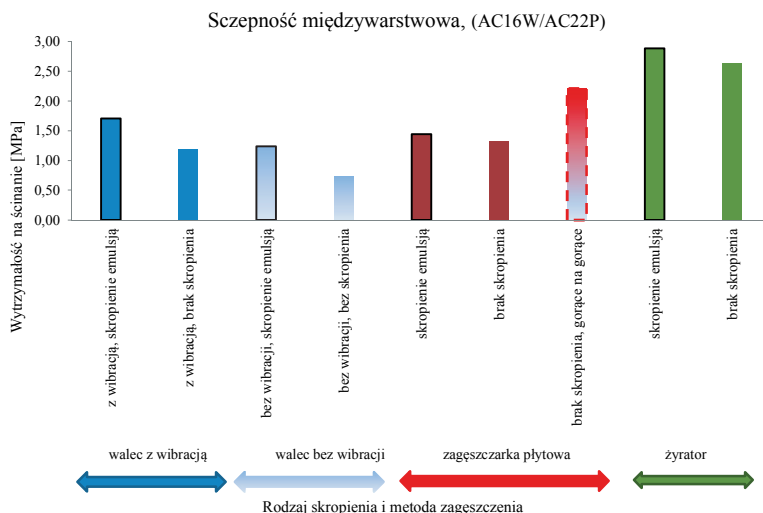


Rys. 2. Wytrzymałość na ścinanie próbek przygotowanych w laboratorium z różną warstwą szczepną

W badaniach [12] stwierdzono, że zabrudzenie pyłami mineralnymi lub zawilgocenie gotowego, dobrze wykonanej warstwy szczepnej obniża wytrzymałość na ścinanie o 10-15%.

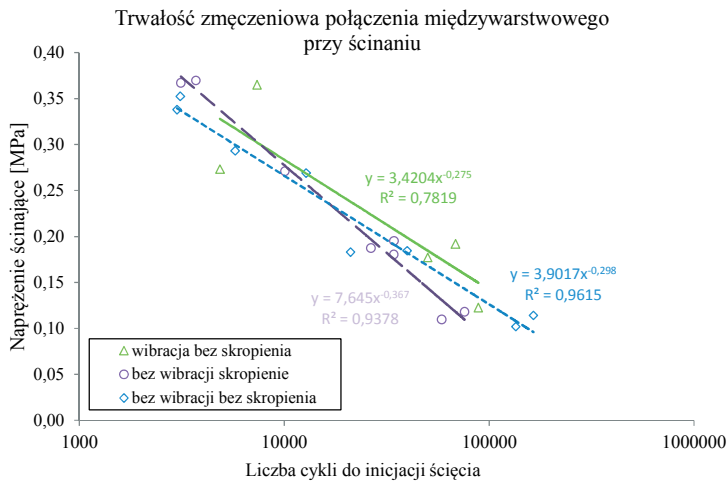
Rys. 3 przedstawia wyniki szepności międzywarstwowej, gdzie przebadano trzy kombinacje warstw szepnych i cztery metody zagęszczenia warstw asfaltowych. Można zauważyć, że rodzaj warstwy szepnej oraz sposób zagęszczania próbek w laboratorium ma istotny wpływ na wynik szepności międzywarstwowej. W każdym przypadku połączeń, gdzie zastosowano emulsję do skropień międzywarstwowych, wyprodukowaną na bazie twardego asfaltu, uzyskano wyższe szepności międzywarstwowe w stosunku do połączeń bez emulsji, poza przypadkiem zastosowania zagęszczenia kolejnych warstw w technologii gorące na gorące bez skropienia emulsją. W tym przypadku uzyskano wysokie wytrzymałości na ścinanie, potwierdzające skuteczność technologii gorące na gorące podczas w budowywania warstw asfaltowych.

Zagęszczenie warstw walcem z wibracją i zagęszczarką pozwala osiągnąć podobną siłę powiązania międzywarstwowego. Od tych dwóch metod zagęszczania nieznacznie niższe wartości wytrzymałości na ścinanie uzyskano przy zagęszczaniu walcem bez wibracji. Najniższą szepność międzywarstwową próbek zagęszczanych w warunkach laboratoryjnych zaobserwowano przy braku skropienia międzywarstwowego i niskiej skuteczności zagęszczenia górnej warstwy walcem bez wibracji. Zdecydowanie najwyższe wytrzymałości na ścinanie uzyskano dla próbek zagęszczanych w żyratorze, zarówno przy i braku skropienia międzywarstwowego. Obserwacje te odgrywają istotne znaczenie podczas porównywania wyników badań szepności międzywarstwowej próbek przygotowywanych w laboratorium, kiedy różnice mogą dochodzić aż do 100% właśnie ze względu na metodę zagęszczenia próbek.



Rys. 3. Wytrzymałość na ścinanie próbek przygotowanych w laboratorium różną metodą zagęszczenia i z różną warstwą szepną

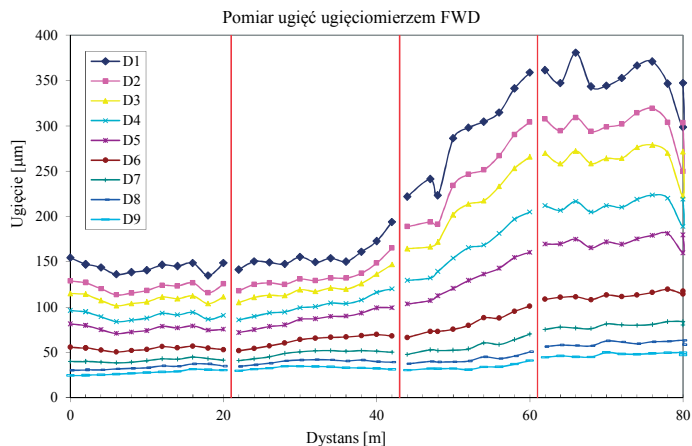
Wykonano także badania zmęczeniowe połączenia międzywarstwowego przy kontrolowanym naprężeniu w schemacie bezpośredniego ścinania, jak w badaniu Leutnera. Zaobserwowano (patrz rys. 4), że przy wysokich poziomach naprężeń ścinających skropienie istotnie wpływa na trwałość połączenia międzywarstwowego. Natomiast przy niższych poziomach naprężeń ścinających skropienie w mniejszym stopniu wpływa na trwałość; istotne znaczenie ma zazębienie ziaren sąsiadujących warstw uzyskane poprzez skuteczne zagęszczenie, wprowadzając wibrację podczas wałowania warstw.



Rys. 4. Trwałość zmęczeniowa połączenia międzywarstwowego przy ścinaniu próbek przygotowanych w laboratorium różną metodą zagęszczenia i z różną warstwą szepną

### 3. Badania terenowe

Badania terenowe na odcinku doświadczalnym, gdzie podczas wbudowywania kolejnych warstw asfaltowych zakłócono powiązanie międzywarstwowo pomiędzy warstwą wiążącą i podbudową asfaltową potwierdzają istotny wpływ szczepności międzywarstwowo na pracę konstrukcji nawierzchni. Jak widać na rys. 5, gdzie na pierwszych 40 m nawierzchni zachowano szczepność międzywarstwową, a na kolejnych 40 m szczepność pomiędzy warstwami wiążącą i podbudową zakłócono, ograniczając do minimum poprzez wprowadzenie dużej ilości pyłów z odpylania lub zaczynu gliniastego, ugięcia nawierzchni rosą ponad dwukrotnie przy braku szczepności. Nieuwzględnienie wadliwego połączenia międzywarstwowo przy obliczeniach odwrotnych (modułów sprężystości warstw konstrukcji nawierzchni na podstawie czaszy ugięć) skutkuje uzyskaniem zaniżonych wartości modułów sztywności warstw asfaltowych [22].



Rys. 5. Ugięcia nawierzchni na odcinku doświadczalnym, gdzie ograniczono szczepność pomiędzy warstwą wiążącą i podbudową asfaltową.

Rys. 6 przedstawia uzyskane wyniki ścinania bezpośredniego wg Leutnera próbek odwierconych z nawierzchni budowanych dróg w funkcji przedziałów wskaźnika zagęszczenia górnej warstwy asfaltowej. Można zaobserwować, że istnieje korelacja pomiędzy szepnością międzywarstwową opisaną poprzez miarodajne maksymalne naprężenie ścinania i wskaźnikiem zagęszczenia górnej warstwy połączenia warstwy wiążącej i podbudowy. Taki sam trend zaobserwowano przy ocenie połączenia warstw ściernalnej i wiążącej [19]. Stwierdzono, że lepsze zagęszczenie warstwy górnej skutkuje lepszym klinowaniem się mieszanki warstwy górnej w warstwie dolnej, co wpływa na wyższą wytrzymałość na ścinanie.



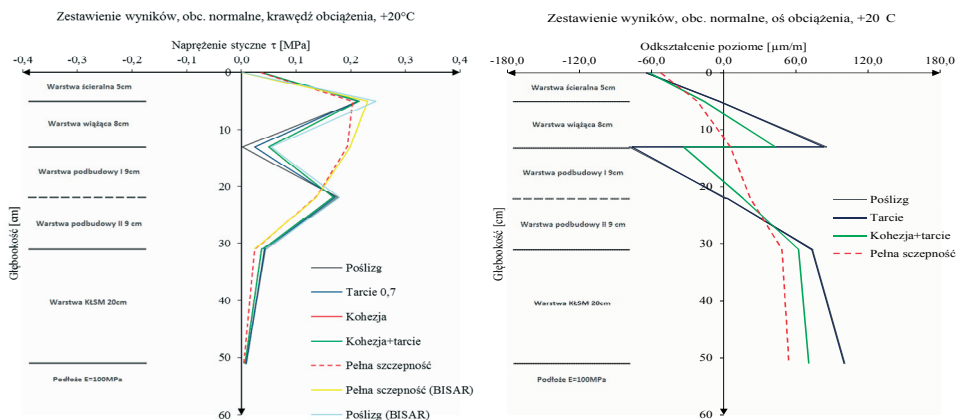
Rys. 6. Miarodajna wytrzymałość na ścinanie w zależności od wskaźnika zagęszczenia warstwy wyżej leżącej, próbki odwiercone z nowobudowanych nawierzchni – 1148 próbek

#### 4. Analizy obliczeniowe

Analizy obliczeniowe konstrukcji nawierzchni wykonano w programie BISAR, który wykorzystuje model wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej oraz w programie ABAQUS, który wykorzystuje metodę elementów skończonych (MES). W wykonanych analizach obliczeniowych konstrukcji nawierzchni modelowano pełną szepność międzywarstwową pomiędzy warstwami asfaltowymi, jak i brak oraz ograniczoną szepność. Pełną szepność i pełen poślizg (brak szepności) modelowano w programie BISAR i ABAQUS, natomiast kontakt z zastosowaniem tarcia pomiędzy powierzchniami i kontakt kohezyjny oraz połączenie tych dwóch ostatnich modeli modelowano w programie ABAQUS. Na podstawie wykonanych obliczeń [13], [19], gdzie ograniczano szepność pomiędzy warstwami ściernalna-wiążąca, wiążąca-podbudowa i pomiędzy warstwami podbudowa górna-dolna stwierdzono, że w konstrukcjach KR6 brak szepności w niższych warstwach istotnie wpływa na trwałość zmęczeniową konstrukcji. Natomiast brak szepności pomiędzy warstwami ściernalna-wiążąca istotnie wpływa na trwałość konstrukcji cieńszych, jak KR3.

W obliczeniach mechanistycznych przy pomocy MES możliwe jest wprost wykorzystanie wyników badań laboratoryjnych ścinania z badania Leutnera, jako krytyczne wartości w modelu kohezyjnym. Symulacje w metodzie MES pozwalają bardziej zbliżyć się do stanu naprężeń i odkształceń, panujących na drodze w przypadku występowania braku szepności podczas badań kontrolnych. W tym przypadku można uwzględnić występujące tarcie pomiędzy warstwami asfaltowymi, jak i aktywującą się w wyższych temperaturach

eksploatacji kohezję asfaltu, co można zaobserwować w zmianach wyników naprężeń ścinających i odkształceń poziomych w płaszczyźnie, gdzie stwierdzono ograniczoną szczepność (patrz rys. 7).



Rys. 7. Naprężenia styczne od obciążeń normalnych, krawędź obciążenia kołowego, temperatura +20°C. Wyniki z obliczeń naprężeń z wykorzystaniem programów Abaqus i Bisar; z obliczeń odkształceń z programu Abaqus przy zastosowaniu różnych modeli szczepności pomiędzy warstwą wiążącą i podbudową

## 5. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz sformułowano następujące wnioski:

- Wadliwe połączenie międzywarstwowe warstw asfaltowych zmniejsza sztywność układu warstw nawierzchni, zwiększając ugięcia nawierzchni, które wywołują zwiększone poziome odkształcenia rozciągające na spodzie warstw asfaltowych, a te zmniejszają trwałość zmęczeniową nawierzchni.
- Szczepność międzywarstwowa istotnie zależy od: rodzaju emulsji w skropieniu, skuteczności zagęszczenia warstw stykających się ze sobą.
- Emulsje asfaltowe do skropienia międzywarstwowego produkowane z asfaltów o penetracji nie większej niż 70/100 j.pen. charakteryzują się najlepszą szczepnością.
- Wpływ na utratę trwałości nawierzchni ma miejsce wystąpienia braku szczepności. W podatnych konstrukcjach dla ruchu KR6 istotne jest połączenie warstwy wiążącej i podbudowy asfaltowej, natomiast dla ruchu KR3 warstwy ściernalnej i wiążącej.
- W modelach teoretycznych można uwzględnić braki i ograniczenia szczepności międzywarstwowej. Metoda MES lepiej symuluje warunki panujące na drodze w zakresie szczepności międzywarstwowej w stosunku do metod wykorzystujących model wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej. Dzięki metodzie MES w analizach możliwe jest wykorzystanie wyników z badania ścinania aparatem Leutnera.

## Literatura

- 1 Judycki J., Szczepność między warstwami asfaltowymi nawierzchni. *Drogownictwo* 9 (2003) 275–279.
- 2 FGSV. *Arbeitsanleitungen zur Prüfung von Asphalt (ALP A-StB), Teil 4, Prüfung des Schichtenverbundes nach Leutner, Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen.*” FGSV, Koln, Germany, 1999.
- 3 Jaskuła P. Ocena szczepności międzywarstwami asfaltowymi nawierzchni. *Drogownictwo* 12, (2006).
- 4 Raposeiras A. C., Castro-Fresno D., Vega-Zamanillo A., Rodriguez-Hernandez J., Test methods and influential factors for analysis of bonding between bituminous pavement layers *Constr. Build. Mater.* 43 (Jun. 2013) pp. 372–381.
- 5 Al-Qadi I. L., Cortina A. S., Hasiba K. I., Ozer H., Leng Z., Mahmoud E., Parish D. C., Worsfold S. J. Best practices for implementation of tack coat: Part 2, Field study Springfield, 2012.
- 6 Al-Qadi I. L., Hasiba K. I., Cortina A. S., Ozer H., Leng Z., Parish D. C., Worsfold S. J. Best practices for implementation of tack coat: Part 1 , Laboratory study,” Springfield, 2012.
- 7 Szczepaniak Z., Wysocki P. *Badania wpływu emulsji asfaltowych na właściwości złączenia warstw nawierzchni asfaltowych, część I, Warsaw, Poland, 2003.*
- 8 Szczepaniak Z., Skierczyński P. *Badania wpływu emulsji asfaltowych na właściwości złączenia warstw nawierzchni asfaltowych, część II, Warsaw, Poland, 2004.*
- 9 Raab C., Partl M. N. Effect of tack coats on interlayer shear bond of pavements, 8th Conference On Asphalt Pavements For Southern Africa, no. September, p. 9, 2004.
- 10 Canestrari F., Santagata E. Temperature effects on the shear behaviour of tack coat emulsions used in flexible pavements, *Int. J. Pavement Eng.*, (Mar. 2005) vol. 6, no. 1, pp. 39–46.
- 11 West R. C., Zhang J., Moore J., Evaluation of bond strength between pavement layers, Auburn, 2005.
- 12 Judycki J., Jaskuła P. *Badania i ocena wpływu szczepności międzywarstwowej na trwałość konstrukcji nawierzchni asfaltowej, etap I, Gdańsk, Poland, 2005.*
- 13 Judycki J., Jaskuła P., Fronc T., Sierosławski T. *Badania i ocena wpływu szczepności międzywarstwowej na trwałość konstrukcji nawierzchni asfaltowej, etap II, Gdańsk, Poland, 2006.*
- 14 Canestrari F., Ferrotti G., Partl M. N., Santagata E. Advanced Testing and Characterization of Interlayer Shear Resistance, *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, no. 1929, (2005) pp. 69–78.
- 15 Raab C., Partl M. N. Interlayer shear performance: experience with different pavement structures 3rd Eurasphalt & Eurobitume Congress Vienna, 2004.
- 16 Sudyka J., Krysiński L., Jaskuła P., Mechowski T., Harasim P. Radar technique in application of interlayer identification connections, 5th International Conference Bituminous Mixtures And Pavements, no. June, p. 12, 2011.
- 17 Collop A. C., Sutanto M. H., Airey G. D., Elliott R. C. Shear bond strength between asphalt layers for laboratory prepared samples and field cores, *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 6, (2009) pp. 2251–2258.
- 18 Vaitkus A., Cygas D., Laurinavicius A., Vorobjovas V., Kleiziene R. Research of asphalt layer bonding in Lithuanian pavement structures, *Gradevinar*, vol. 64, no. 11, (2012) pp. 915–920.
- 19 Judycki J., Jaskuła P. *Modelowanie teoretyczne wpływu szczepności międzywarstwowej na zachowanie się nawierzchni asfaltowych, etap III, Gdańsk, Poland, 2013.*
- 20 Hakim B. A., Cheung L. W., Armitage R. J. Use of FWD data for prediction of bonding between pavement layers, *Int. J. Pavement Eng.*, vol. 1, no. 1, (2000) p. 28.
- 21 Mehta Y. *Evaluation of Interlayer Bonding in HMA Pavements*, Rowan, 2007.
- 22 Jaskuła P. Wpływ braku szczepności międzywarstwowej na wartość modułów warstw asfaltowych obliczanych na podstawie ugięć. *Drogownictwo* 1, (2010) pp. 13–17.





## Studies and analysis on interlayer bonding in asphalt pavements

Piotr Jaskula

*Department of Highway Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering,  
Gdansk University of Technology, e-mail: piotr.jaskula@wilis.pg.gda.pl*

**Abstract:** The paper describes research works of interlayer bonding of asphalt layers conducted at Gdansk University of Technology. The studies included laboratory and field tests, and calculation of pavement structures with different interlayer bonding models. Laboratory tests included interlayer bonding tests using the direct shear method which evaluated the influence of selected factors on interlayer bonding: the type and the amount of the emulsion, the method and the effectiveness of compaction, vulnerability to dirt, water and repeated shear loads. Field works were focused on the impact of interlayer bonding of asphalt layers on the deflection of pavement structure and the back-calculated stiffness modulus of asphalt mixtures. The analyses of the field tests also included the impact of the asphalt layers compaction ratio on interlayer bonding. Computational analyses of asphalt pavement structures consisted of the simulation of different interlayer bonding in a multi-layered elastic half-space. Calculations were also made by using the finite element method within cohesion and friction models to simulate interlayer bonding.

**Keywords:** interlayer bonding, tack coat, pavement structure, deflection of pavement, multi-layered elastic half-space, FEM

