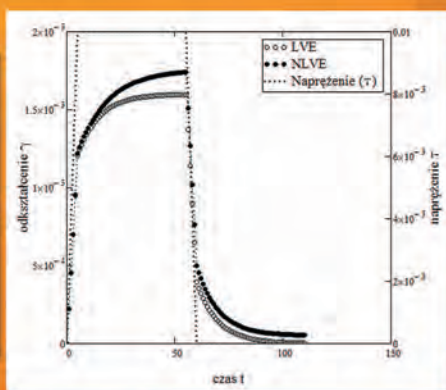


MONOGRAFIE, STUDIA, ROZPRAWY

M118

Grzegorz Mazurek

**LINIOWA I NIELINIOWA
LEPKOSPĘŻYSTA CHARAKTERYSTYKA
MASTYKSU ASFALTOWEGO
W ZAKRESIE WYSOKICH TEMPERATUR
EKSPLOATACYJNYCH NAWIERZCHNI**



Politechnika Świętokrzyska

Kielce 2019

MONOGRAFIE, STUDIA, ROZPRAWY

M118

Grzegorz Mazurek

**LINIOWA I NIELINIOWA
LEPKOSPREŻYSTA CHARAKTERYSTYKA
MASTYKSU ASFALTOWEGO
W ZAKRESIE WYSOKICH TEMPERATUR
EKSPLOATACYJNYCH NAWIERZCHNI**

Kielce 2019

MONOGRAFIE, STUDIA, ROZPRAWY NR M118

Redaktor Naukowy serii

INŻYNIERIA LĄDOWA I TRANSPORT

prof. dr hab. inż. Jerzy WAWRZEŃCZYK

Recenzenci:

dr hab. inż. Piotr MACKIEWICZ

dr hab. inż. Paweł MIECZKOWSKI

Redakcja

Aneta STARZYK

Projekt okładki

Tadeusz UBERMAN

© Copyright by Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2019

Wszelkie prawa zastrzeżone. Żadna część tej pracy nie może być powielana czy rozpowszechniana w jakiegokolwiek formie, w jakikolwiek sposób: elektroniczny bądź mechaniczny, włącznie z fotokopiowaniem, nagrywaniem na taśmy lub przy użyciu innych systemów, bez pisemnej zgody wydawcy.

PL ISSN 1897-2691

PL ISBN 978-83-65719-60-7

Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej
25-314 Kielce, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7
tel./fax 41 34 24 581
e-mail: wydawca@tu.kielce.pl
www.wydawnictwo.tu.kielce.pl

SPIS TREŚCI

1. Wstęp	7
1.1. Przegląd literatury na temat wpływu wypełniacza mineralnego na reologię mastyksu	10
2. Cel i zakres pracy	22
3. Model lepkosprężysty kompozytów mineralno-asfaltowych	26
3.1. Wprowadzenie	26
3.2. Charakterystyka lepkosprężysta pracy kompozytów mineralno-asfaltowych	27
3.3. Podstawowe próby reologiczne	28
3.3.1. Identyfikacja liniowej i nieliniowej lepkosprężystości	30
3.3.2. Związki konstytutywne lepkosprężystości	32
3.3.3. Proste modele fizyczne jedno- i dwuparametrowe	35
3.3.4. Modele wieloparametrowe	40
3.3.5. Modele uogólnione	43
3.3.6. Modele uogólnione wyrażone równaniami całkowymi	48
3.3.7. Modele matematyczne funkcji pełzania	51
3.3.8. Metody badawcze	53
3.3.9. Numeryczna konwersja między funkcją relaksacji $E(t)$ i pełzania $D(t)$	55
3.3.10. Numeryczna konwersja między funkcją modułu dynamicznego relaksacji $ E^* $ oraz pełzania $ D^* $	58
3.4. Podsumowanie	60
4. Relacje konstytutywne nieliniowej lepkosprężystości	62
4.1. Modelowanie nieliniowej lepkosprężystości	68
4.2. Klasyczna metoda identyfikacji stałych materiałowych modelu Schapery'ego	68
4.3. Zasada superpozycji czas-temperatura	71
4.4. Podsumowanie	73
5. Mastyks jako efektywne lepiszcze w mieszanke mineralno-asfaltowej	74
5.1. Charakterystyka wypełniacza mineralnego w mieszanke mineralno-asfaltowej w świetle wymagań technicznych	74

5.2. Optymalizacja ilości wypełniacza mineralnego w mastyksie	77
5.3. Metody badawcze właściwości reologicznych asfaltu i mastyksu	80
5.3.1. Podstawowe badania asfaltu	80
5.3.2. Podstawowe badania wypełniaczy mineralnych	81
5.3.3. Badania reologiczne asfaltu i mastyksu w zakresie liniowej lepkosprężystości (LVE)	84
5.3.4. Badania reologiczne asfaltu i mastyksu w zakresie nieliniowej lepkosprężystości (NLVE)	89
5.4. Autorska metoda wyznaczenia granicznej wartości wypełniacza	92
6. Materiały wykorzystane w badaniach	96
6.1. Wybór materiałów do eksperymentu	96
6.2. Procedura sporządzenia kompozycji mastyksów	99
6.3. Etapy badań oceny charakterystyki nieliniowych zjawisk w mastyksie	100
7. Analiza wyników badań wypełniaczy oraz mastyksu za pomocą normowych metod pomiarowych	102
7.1. Obserwacje mikroskopowe struktury wypełniaczy mineralnych	102
7.2. Badania wybranych właściwości wypełniaczy mineralnych	105
7.3. Określenie granicznej ilości wypełniacza mineralnego w mastyksie	113
7.4. Badania dynamiczne mastyksu w reometrze w zakresie LVE	119
7.5. Wpływ rodzaju wypełniacza mineralnego na lepkość przy niskiej prędkości ścinania (LSV)	124
7.6. Wpływ rodzaju wypełniacza mineralnego na podatność oraz nawrót sprężysty według MSCR	125
8. Modelowanie zjawiska pełzania w zakresie liniowej i nieliniowej lepkosprężystości	128
8.1. Alternatywna metoda identyfikacji parametrów modelu Schapery'ego ...	129
8.2. Numeryczny algorytm nieliniowego modelu Schapery'ego	134
8.3. Kalibracja parametrów nieliniowego modelu lepkosprężystości	137
8.3.1. Krzywa wiodąca funkcji pełzania mastyksu w zakresie liniowej lepkosprężystości	137
8.3.2. Identyfikacja parametrów nieliniowego modelu lepkosprężystości	147
8.3.3. Dokładność estymacji parametrów nieliniowej lepkosprężystości	153

8.3.4. Kalibracja funkcji wiążącej parametrów nieliniowej lepkości	155
9. Analiza stanu odkształcenia masyksów w zakresie nieliniowej lepkości	168
9.1. Numeryczna symulacja odkształcenia masyksu	168
9.2. Stabilność parametrów modelu nieliniowej lepkości	179
9.3. Korelacja między parametrami nieliniowej lepkości a właściwościami funkcjonalnymi i strukturalnymi masyksu	190
9.4. Walidacja uzyskanych wzorów regresyjnych parametrów modelu nieliniowej lepkości masyksów	203
10. Wnioski	208
Literatura	214
Streszczenie	230
Summary	231

LITERATURA

- [1] „Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych”. 2014.
- [2] J. Judycki i in., Analizy i projektowanie konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2014.
- [3] M. F. Woldekidan, Response Modelling of Bitumen, Bituminous Mastic and Mortar. Technische Universiteit Delft, 2011.
- [4] G. Schramm, Reologia: podstawy i zastosowania. Poznań: Ośrodek Wydawnictw Naukowych PAN, 1998.
- [5] WT-1, „Kruszywa do mieszanek mineralno-asfaltowych i powierzchniowych utrwaleń na drogach krajowych”. GDDKiA, Warszawa, 2014.
- [6] J. Piłat i P. Radziszewski, Nawierzchnie asfaltowe: podręcznik akademicki. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2010.
- [7] J. Read, D. Whiteoak, i R. N. Hunter, The Shell Bitumen handbook, 5th ed. London: Thomas Telford, 2003.
- [8] B. Stefańczyk i P. Mieczkowski, Mieszanki mineralno-asfaltowe: wykonawstwo i badania [Bituminous Mixtures. Performance and research] (in Polish). Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2009.
- [9] P. J. Rigden, „The use of fillers in bituminous road surfacings. A study of filler-binder systems in relation to filler characteristics”, Journal of the Society of Chemical Industry, t. 66, nr 9, s. 299–309, wrz. 1947.
- [10] V. P. Puzinauskas, „Filler in asphalt mixtures”, College Park, Md :Asphalt Insitute, Research Raport 69-2, 1969.
- [11] W. Grabowski, Struktura a właściwości funkcjonalne wypełniaczy mineralnych stosowanych w drogownictwie. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2007.
- [12] J. Piłat, Wpływ właściwości mączek mineralnych na kształtowanie cech technicznych kompozytów mineralno-asfaltowych. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 1994.
- [13] I. Gawęł, M. Kalabińska, J. Piłat, i Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Asfalty drogowe. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2014.
- [14] B. S. Underwood i Y. R. Kim, „Nonlinear viscoelastic analysis of asphalt cement and asphalt mastics”, International Journal of Pavement Engineering, t. 16, nr 6, s. 510–529, lip. 2015.
- [15] A. Jamshidi, M. O. Hamzah, i Z. You, „Performance of Warm Mix Asphalt containing Sasobit®: State-of-the-art”, Construction and Building Materials, t. 38, s. 530–553, sty. 2013.
- [16] M. Iwański i G. Mazurek, „Structuring role of F-T synthetic wax in bitumen”, Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, t. 62, nr 3, sty. 2014.
- [17] M. Zeng i C. Wu, „Effects of Type and Content of Mineral Filler on Viscosity of Asphalt Mastic and Mixing and Compaction Temperatures of Asphalt Mixture”, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, t. 2051, s. 31–40, grudz. 2008.

- [18] A. R. Pasandín i I. Pérez, „The influence of the mineral filler on the adhesion between aggregates and bitumen”, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, t. 58, s. 53–58, kwi. 2015.
- [19] C. Richadson, „The Theory of the Perfect Sheet Asphalt Surface”, *Journal of Industrial & Engineering Chemistry*, t. 7, nr 6, s. 463–465, cze. 1915.
- [20] A. W. Adamson, *Chemia fizyczna powierzchni*. Warszawa: PWN, 1963.
- [21] Z. Wiłun i Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, *Zarys geotechniki: podręcznik akademicki*. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2013.
- [22] J. S. Miller i Traxler, „Some of fundamental physical characteristics of Mineral filler intended for asphalt paving mixtures”, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 1932.
- [23] B. F. Kallas i V. P. Puzinauskas, „A Study of Mineral Fillers in Asphalt Paving Mixtures (With Discussion)”, *Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT)*, t. 30, s. 493–528, 1961.
- [24] W. Heukelom i P. W. O. Wijga, „Viscosity of Dispersions as Governed by Concentration and Rate of Shear”, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, t. 40, s. 418–437, 1971.
- [25] V. Antunes, A. C. Freire, L. Quaresma, i R. Micaelo, „Influence of the geometrical and physical properties of filler in the filler–bitumen interaction”, *Construction and Building Materials*, t. 76, s. 322–329, luty 2015.
- [26] D. G. Tunnicliff, „A review of mineral filler”, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, t. 31, s. 118–150, 1962.
- [27] M. Guo, Y. Tan, L. Wang, i Y. Hou, „A state-of-the-art review on interfacial behavior between asphalt binder and mineral aggregate”, *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, t. 12, nr 2, s. 248–259, cze. 2018.
- [28] R. S. Winniford, „The rheology of Asphalt-Filler Systems as Shown by the Microviscometer”, *American Society for Testing and Materials*, s. 109–120, 1961.
- [29] J. P. Zhang, J. Z. Pei, i Y. W. Li, „Research on Interaction between Asphalt and Filler Based on DSR Test”, *Advanced Materials Research*, t. 723, s. 480–487, sie. 2013.
- [30] X. Z. Shao, Y. Q. Tan, i M. H. Shao, „Research on Microstructure of Asphalt Mortar”, *Highway*, t. 12, s. 105–108, 2003.
- [31] Y. Tan i M. Guo, „Micro- and Nano-Characteration of Interaction Between Asphalt and Filler”, *Journal of Testing and Evaluation*, t. 42, nr 5, s. 20130253, wrz. 2014.
- [32] A. Einstein, „Investigation on the Theory of Brownian Motion”, *Analytical Physic*, 1959.
- [33] D. G. Thomas, „Transport characteristics of suspension: VIII. A note on the viscosity of Newtonian suspensions of uniform spherical particles”, *Journal of colloid science*, t. 20, s. 267–277, 1965.
- [34] J. W. Ju i T. M. Chen, „Effective elastic moduli of two-phase composites containing randomly dispersed spherical inhomogeneities”, *Acta Mechanica*, t. 103, nr 1–4, s. 123–144, mar. 1994.
- [35] W. G. Buttlar, D. Bozkurt, i G. G. Al-Khateeb, „Understanding asphalt mastic behavior through micromechanics”, *Transportation Research Record: Journaln of the Transportation Research Board*, nr 1681, s. 157–169, 1999.

- [36] D. A. Anderson i W. H. Goetz, „Mechanical Behavior and Reinforcement of Mineral Filler- Asphalt Mixtures”, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, t. 42, s. 37–66, 1977.
- [37] J. Craus, I. Ishai, i A. Sides, „Some Physico-Chemical Aspects of the Effect and the Role of the Filler in Bituminous Paving Mixtures”, zaprezentowano na Association of Asphalt Paving Technologists, 1978, t. 47, s. 558–588.
- [38] E. I. Duktaz i D. A. Anderson, „The Effect of Various Fillers on the Mechanical Behavior Of Asphalt And Asphalt Concrete”, zaprezentowano na Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings, 1980, t. 49, s. 530–549.
- [39] R. Meininger, Red., *Effects of Aggregates and Mineral Fillers on Asphalt Mixture Performance*. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959: ASTM International, 1992.
- [40] C. W. Curtis, K. Ensley, i J. Epps, „Fundamental Properties of Asphalt-Aggregate Interactions Including Adhesion and Absorption”. SHRP-A-341, National Academy of Science, USA, 1993.
- [41] G. Fritschy i E. Papirer, „Interactions between a bitumen, its components and model fillers”, *Fuel*, t. 57, nr 11, s. 701–704, lis. 1978.
- [42] J. Judycki i P. Jaskuła, „Badania oddziaływania wody i mrozu na betony asfaltowe o zwiększonej odporności na deformacje trwałe”, *Drogownictwo*, nr 12, s. 367–371, 1999.
- [43] M. Iwański, „Adsorpcja asfaltu przez kruszywo w mieszanke mineralno-asfaltowej”, *Drogownictwo*, nr 9, s. 290–296, 2012.
- [44] D. C. Transportation Research Board (Washington i Committee on Bituminous-Aggregate Combinations to Meet Surface Requirements, Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements – a National Seminar: 2003 : San Diego, Calif. Washington, DC: TRB, 2003.
- [45] C. Clopotel i H. Bahia, „The effect of bitumen polar groups adsorption on mastics properties at low temperatures”, *Road Materials and Pavement Design*, t. 14, nr sup1, s. 38–51, kwi. 2013.
- [46] J. L. Deng, *Contr. Lett.*, t. 1, s. 288, 1982.
- [47] Y. Cheng i in., „Influence of the properties of filler on high and medium temperature performances of asphalt mastic”, *Construction and Building Materials*, t. 118, s. 268–275, sie. 2016.
- [48] V. Antunes, A. C. Freire, L. Quaresma, i R. Micaelo, „Effect of the chemical composition of fillers in the filler – bitumen interaction”, *Construction and Building Materials*, t. 104, s. 85–91, luty 2016.
- [49] R. Lackner, M. Spiegl, R. Blab, i J. Eberhardsteiner, „Is Low-Temperature Creep of Asphalt Mastic Independent of Filler Shape and Mineralogy? – Arguments from Multiscale Analysis”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, t. 17, nr 5, s. 485–491, paź. 2005.
- [50] A. Diab i M. Enieb, „Investigating influence of mineral filler at asphalt mixture and mastic scales”, *International Journal of Pavement Research and Technology*, t. 11, nr 3, s. 213–224, maj 2018.

- [51] M. Guo, Y. Tan, J. Yu, Y. Hou, i L. Wang, „A direct characterization of interfacial interaction between asphalt binder and mineral fillers by atomic force microscopy”, *Materials and Structures*, t. 50, nr 2, kwi. 2017.
- [52] Y. Tan i M. Guo, „Interfacial thickness and interaction between asphalt and mineral fillers”, *Materials and Structures*, t. 47, nr 4, s. 605–614, kwi. 2014.
- [53] C. Li, Z. Chen, S. Wu, B. Li, J. Xie, i Y. Xiao, „Effects of steel slag fillers on the rheological properties of asphalt mastic”, *Construction and Building Materials*, t. 145, s. 383–391, sie. 2017.
- [54] F. L. Roberts, P. S. Kandhal, E. R. Brown, D.-Y. Lee, i T. W. Kennedy, „Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction. Second Edition”, zaprezentowano na National Asphalt Pavement Association Research and Education Foundation, Maryland, 1996.
- [55] A. F. Faheem i H. U. Bahia, „Modelling of Asphalt Mastic in Terms of Filler-Bitumen Interaction”, *Road Materials and Pavement Design*, t. 11, nr sup1, s. 281–303, sty. 2010.
- [56] Y.-R. Kim i D. N. Little, „Linear Viscoelastic Analysis of Asphalt Mastics”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, t. 16, nr 2, s. 122–132, kwi. 2004.
- [57] M. Pasetto, A. Baliello, G. Giacomello, i E. Pasquini, „Rheological Characterization of Warm-Modified Asphalt Mastics Containing Electric Arc Furnace Steel Slags”, *Advances in Materials Science and Engineering*, t. 2016, s. 1–11, 2016.
- [58] Y. Xue, H. Hou, S. Zhu, i J. Zha, „Utilization of municipal solid waste incineration ash in stone mastic asphalt mixture: Pavement performance and environmental impact”, *Construction and Building Materials*, t. 23, nr 2, s. 989–996, luty 2009.
- [59] D. Movilla-Quesada, A. C. Raposeiras, D. Castro-Fresno, i D. Peña-Mansilla, „Experimental study on stiffness development of asphalt mixture containing cement and Ca(OH)₂ as contribution filler”, *Materials & Design*, t. 74, s. 157–163, cze. 2015.
- [60] P. Buczyński i M. Iwański, „Inactive Mineral Filler as a Stiffness Modulus Regulator in Foamed Bitumen-Modified Recycled Base Layers”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, t. 245, s. 032042, paź. 2017.
- [61] M. Iwański, P. Buczyński, i G. Mazurek, „The use of gabbro dust in the cold recycling of asphalt paving mixes with foamed bitumen”, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, t. 64, nr 4, s. 763–773, grudz. 2016.
- [62] D. A. Anderson i J. P. Tarris, „Effect Of Baghouse Fines on Mixture Design Properties”, zaprezentowano na National Asphalt Pavement Association (NAPA), 1982, t. 102.
- [63] M. A. Shahrour i B. G. Saloukeh, „Baghouse Dust and its Effecton Asphaltic Mixtures, Reseach Report”, California Department of Transportation, CA-DOT-TL-3140-1-76-50, 1976.
- [64] L. A. Cooley, M. Stroup-Gardinder, E. R. Brown, D. I. Hanson, i M. O. Fletcher, „Characterization of Asphalt-Filler Mortars with Superpave Binder Tests”, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, t. 67, 1998.
- [65] C.-W. Huang, *Development and Numerical Implementation of Nonlinear Viscoelastic-Viscoplastic Model for Asphalt Materials*. Texas A&M University, 2008.

- [66] R. Miró, A. H. Martínez, F. E. Pérez-Jiménez, R. Botella, i A. Álvarez, „Effect of filler nature and content on the bituminous mastic behaviour under cyclic loads”, *Construction and Building Materials*, t. 132, s. 33–42, luty 2017.
- [67] Euraspphalt & Eurobitume Congress, European Asphalt Pavement Association, i European Bitumen Association, Red., 2nd Euraspphalt & Eurobitume Congress, 20-22 September, 2000, Barcelona, Spain: proceedings of the papers submitted for review. Breukelen, The Netherlands: Foundation Euraspphalt, 2000.
- [68] H. U. Bahia, H. Zhai, K. Onnetti, i S. Kose, „Non-Linear Viscoelastic and Fatigue Properties of Asphalt Binders”, zaprezentowano na *Asphalt Paving Technology*, 1999, t. 68, s. 1–34.
- [69] M.-C. Liao, J.-S. Chen, i K.-W. Tsou, „Fatigue Characteristics of Bitumen-Filler Mastics and Asphalt Mixtures”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, t. 24, nr 7, s. 916–923, lip. 2012.
- [70] D. Sun, T. Lin, X. Zhu, i L. Cao, „Calculation and evaluation of activation energy as a self-healing indication of asphalt mastic”, *Construction and Building Materials*, t. 95, s. 431–436, paź. 2015.
- [71] G. Mazzoni, A. Stimilli, F. Cardone, i F. Canestrari, „Fatigue, self-healing and thixotropy of bituminous mastics including aged modified bitumens and different filler contents”, *Construction and Building Materials*, t. 131, s. 496–502, sty. 2017.
- [72] S. Shen, G. D. Airey, S. H. Carpenter, i H. Huang, „A Dissipated Energy Approach to Fatigue Evaluation”, *Road Materials and Pavement Design*, t. 7, nr 1, s. 47–69, sty. 2006.
- [73] B. S. Underwood, „A continuum damage model for asphalt cement and asphalt mastic fatigue”, *International Journal of Fatigue*, t. 82, s. 387–401, sty. 2016.
- [74] WT-2, „Nawierzchnie asfaltowe na drogach krajowych. Mieszanki mineralno-asfaltowe”. GDDKiA, Warszawa, 2014.
- [75] D. Lesueur i D. N. Little, „Effect of Hydrated Lime on Rheology, Fracture, and Aging of Bitumen”, *Transportation Research Record*, nr 1661, s. 93–99, 1999.
- [76] R. Micaelo, A. Guerra, L. Quaresma, i M. T. Cidade, „Study of the effect of filler on the fatigue behaviour of bitumen-filler mastics under DSR testing”, *Construction and Building Materials*, t. 155, s. 228–238, lis. 2017.
- [77] R. G. Hicks, „Moisture damage in asphalt concrete”. NCHRP synthesis of highway practice 175, Transportation Research Board, National Research Council, 1991.
- [78] J. Judycki i P. Jaskuła, „Badania odporności betonu asfaltowego zawierającego wapno hydratyzowane na działanie wody i mrozu”, V Międzynarodowa Konferencja Trwałe i Bezpieczne Nawierzchnie Drogowe, s. 111–118, maj 1999.
- [79] J. Pilat i P. Radziszewski, „Wapno hydratyzowane. Wpływ na właściwości mastyksów i betonów asfaltowych”, *Autostrady*, nr 1–2, s. 58–62, 2006.
- [80] Z. Piasta i A. Lenarcik, „Applications of statistical multi-criteria optimisation in design of concretes. Optimization Methods for Material Design of Cement-based Composites”. E & FN Spon, London, New York, 1998.
- [81] M. Iwański i G. Mazurek, „Rheological properties of the bituminous binder extracted from SMA pavement with hydrated lime”, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, t. 11, nr 2, s. 93–101, cze. 2016.

- [82] M. Iwanski i G. Mazurek, „The effect of hydrated lime on the rheological properties of extracted bitumen from stone mastic asphalt”, *Cement Wapno Beton*, t. R. 19/81, nr 6, s. 376–383, 2014.
- [83] G. Mazurek i M. Iwański, „Applying of 2S2P1D model for assessing viscoelastic properties of bituminous binder extracted from SMA mixture with hydrated lime addition”, *Cement Wapno Beton*, t. 23, nr 2, s. 124-, 2018.
- [84] D. G. Tunnicliff, „Binding Effects of Mineral Filler”, zaprezentowano na *Assoc Asphalt Paving Technol Proc*, 1967, t. 36, s. 114–154.
- [85] K. Błażejowski, *Wapno hydratyzowane: sprawdzony dodatek do trwałych nawierzchni asfaltowych: przegląd literatury*. Brussels; Kraków: EuLA – European Lime Association; Stowarzyszenie Przemysłu Wapienniczego, 2011.
- [86] D. Lesueur, J. Petit, i H.-J. Ritter, „The mechanisms of hydrated lime modification of asphalt mixtures: a state-of-the-art review”, *Road Materials and Pavement Design*, t. 14, nr 1, s. 1–16, mar. 2013.
- [87] D. Lesueur, „Hydrated lime: A proven additive for durable asphalt pavements – Critical literature review”. Brussels: European Lime Association (EuLA), 2010.
- [88] J. Bari i M. W. Witzak, „Evaluation of the effect of lime modification on the dynamic modulus stiffness of hot mix asphalt: Use with the new Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide”. *Transportation Research Report 1929*, 2005.
- [89] D. Lesueur, J. Petit, i H. J. Ritter, „Increasing the durability of asphalt mixtures by hydrated lime addition: What evidence?”, *European Roads Review*, t. 20, s. 48–55, 2012.
- [90] H. Wang, I. L. Al-Qadi, A. F. Faheem, H. U. Bahia, S.-H. Yang, i G. H. Reinke, „Effect of Mineral Filler Characteristics on Asphalt Mastic and Mixture Rutting Potential”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, t. 2208, nr 1, s. 33–39, sty. 2011.
- [91] G. D. Airey, M.-C. Liao, i N. H. Thom, „Fatigue Behaviour of Bitumen-Filler Mastics”, zaprezentowano na *10th International Conference on Asphalt Pavements*, Quebec City, Canada, 2006, t. 1, s. 485–495.
- [92] P. Cramer, G. Herz, i M. Randenberg, „Kalhydrat: eine alternative zur modifizierung des bindemittels”, *Asphalt*, t. 6, s. 17–25, 2001.
- [93] K. Schellenberg i H. J. Eulitz, „Verbesserung von Asphalteigenschaften durch Einsatz von Kalkhydrat”, *Bitumen*, t. 1, s. 2–8, 1999.
- [94] W. Grabowski, J. Wilanowicz, i T. Sobol, „Structural and functional properties of mineral fillers modified with hydrated lime”, zaprezentowano na *Proceedings of the 6th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control (MAIREPAV6)*, Torino, Italy, 2009.
- [95] J. L. M. Voskuilen, „Causes of premature ravelling failure in porous asphalt”, 2003, s. 191–197.
- [96] M. Iwanski i G. Mazurek, „Effect of Fischer-Tropsch synthetic wax additive on the functional properties of bitumen”, *Polimery*, t. 60, nr 04, s. 272–278, kwi. 2015.
- [97] G. Mazurek, „Analysis of selected properties of asphalt concrete with synthetic wax”. *Polish Academy of Sciences*, 30-kwi-2018.

- [98] K. Yan, H. Xu, i H. Zhang, „Effect of mineral filler on properties of warm asphalt mastic containing Sasobit”, *Construction and Building Materials*, t. 48, s. 622–627, lis. 2013.
- [99] G. Mazurek, „Rheological Properties of Mastic with the Addition of Synthetic Wax and Hydrated Lime within the Viscoelastic Region”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, cze. 2018.
- [100] „Test Methods and Specification Criteria for Mineral Filler Used in HMA”, National Cooperative Highway Research Program, University of Wisconsin-Madison, Revised Draft Final Report 12/28/2010 NCHRP Report 9-45.
- [101] B. Delaporte, H. Di Benedetto, P. Chaverot, i G. Gauthier, „Linear viscoelastic properties of bituminous materials: From binders to mastics”, *Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions*, t. 76, s. 455–494, 2007.
- [102] J. C. Petersen i Strategic ReHighway search Program (U.S.), Binder characterization and evaluation. Washington, D.C.: Strategic Highway Research Program, National Research Council, 1994.
- [103] E. Masad, C.-W. Huang, J. D’Angelo, i D. Little, „Characterization of asphalt binder resistance to permanent deformation based on nonlinear viscoelastic analysis of multiple stress creep recovery (MSCR) test”, *Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions*, t. 78, s. 535–562, 2009.
- [104] X. Lu i U. Isacsson, „Effect of ageing on bitumen chemistry and rheology”, *Construction and Building Materials*, t. 16, nr 1, s. 15–22, luty 2002.
- [105] Y.-R. Kim, Mechanistic fatigue characterization and damage modeling of asphalt mixtures /. Texas A&M University, 2003.
- [106] E. Masad, C.-W. Huang, G. Airey, i A. Muliana, „Nonlinear viscoelastic analysis of unaged and aged asphalt binders”, *Construction and Building Materials*, t. 22, nr 11, s. 2170–2179, lis. 2008.
- [107] A. Motamed, A. Bhasin, i K. M. Liechti, „Interaction nonlinearity in asphalt binders”, *Mechanics of Time-Dependent Materials*, t. 16, nr 2, s. 145–167, maj 2012.
- [108] A. Motamed, A. Bhasin, i K. M. Liechti, „Constitutive modeling of the nonlinearly viscoelastic response of asphalt binders; incorporating three-dimensional effects”, *Mechanics of Time-Dependent Materials*, t. 17, nr 1, s. 83–109, luty 2013.
- [109] D. Anderson, R. Dongre, D. Christensen, i E. Dukatz, „Effects of Minus No. 200-Sized Aggregate on Fracture Behavior of Dense-Graded Hot-Mix Asphalt”, w *Effects of Aggregates and Mineral Fillers on Asphalt Mixture Performance*, R. Meininger, Red. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959: ASTM International, 1992, s. 154-154–23.
- [110] I. Kisiel, *Reologia w budownictwie*. ARKADY, 1967.
- [111] A. Bodnar, M. Chrzanowski, i P. Latus, *Reologia konstrukcji prętowych: podręcznik dla studentów wyższych szkół technicznych*. Kraków: Wydawnictwo PK, 2006.
- [112] V. Volterra, *Theory of functionals and of integral and integro-differential equations*. Mineola, N.Y: Dover Publications, 2005.

- [113] S. P. C. Marques i G. J. Creus, Computational viscoelasticity. Heidelberg ; New York: Springer, 2012.
- [114] Y. R. Kim, Red., Modeling of asphalt concrete. Reston, VA : New York: ASCE Press ; McGraw-Hill, 2009.
- [115] H. F. Brinson i L. C. Brinson, Polymer engineering science and viscoelasticity: an introduction. New York: Springer, 2008.
- [116] W. Komar, Lepkosprężyste związki konstytutywne w tkaninach technicznych. Politechnika Gdańska, 2007.
- [117] J. Judycki, M. Pszczoła, M. Jaczewski, Ł. Mejłun, i D. Ryś, „Badanie wpływu zastosowania warstw betonu asfaltowego o wysokim module sztywności (Ac-Wms) w konstrukcjach nawierzchni na spękania niskotemperaturowe i na zmniejszenie powstawania deformacji trwałych – raport z trzeciego etapu”, Gddkia, Warszawa, etap trzeci, 2013.
- [118] J. C. Simo i T. J. R. Hughes, Computational inelasticity. New York: Springer, 1998.
- [119] J. Ostrowska-Maciejewska, Mechanika ciał odkształcalnych. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 1994.
- [120] Y. Zhang, R. Luo, i R. L. Lytton, „Characterization of viscoplastic yielding of asphalt concrete”, Construction and Building Materials, t. 47, s. 671–679, paź. 2013.
- [121] G. Mazurek, „Analysis of selected properties of asphalt concrete with synthetic wax”, Bulletin Of The Polish Academy Of Sciences Technical Sciences, t. 66, nr 2, 2018.
- [122] G. D. Airey, B. Rahimzadeh, i A. C. Collop, „Viscoelastic linearity limits for bituminous materials”, Materials and Structures, t. 36, nr 10, s. 643–647, grudz. 2003.
- [123] G. D. Airey, B. Rahimzadeh, i A. C. Collop, „Evaluation of the linear and nonlinear viscoelastic behaviour of bituminous binders and asphalt mixtures”, zaprezentowano na International Symposium on Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, 2002.
- [124] R. T. Nagórski, K. Błażejowski, i Wydawnictwo Naukowe PWN, Mechanika nawierzchni drogowych w zarysie. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN SA, 2014.
- [125] W. N. Findley, J. S. Lai, i K. Onaran, Creep and relaxation of nonlinear viscoelastic materials: with an introduction to linear viscoelasticity. New York: Dover, 1989.
- [126] M. Chrzanowski, Reologia ciał stałych, Politechnika Krakowska. 1995.
- [127] A. Pożarycki i P. Górnaś, „Numeryczny model właściwości lepkosprężystych warstw nawierzchni jezdni z betonu asfaltowego”, Budownictwo i Architektura, t. 13, nr 4, s. 203–213, 2014.
- [128] Y. Liu i Z. You, „Determining Burger’s Model Parameters of Asphalt Materials Using Creep-Recovery Testing Data”, w Pavements and Materials, Minneapolis, Minnesota, United States, 2008, s. 26–36.
- [129] P. Mackiewicz, „Parametry materiałowe mieszanek mineralno-asfaltowych w badaniu statycznym i dynamicznym”, Materiały Budowlane, t. 1, nr 10, s. 56–59, paź. 2015.

- [130] A. Jakowluk, *Procesy pełzania i zmęczenia w materiałach*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1993.
- [131] Ł. Mejłun i J. Judycki, „Analiza konstrukcji nawierzchni asfaltowych oparta o teorię lepkosprężystości”, *Drogownictwo*, t. 10, s. 315–320, 2012.
- [132] F. Xie, D. Zhang, A. Zhou, B. Ji, i L. Chen, „On the Viscoelastic Parameters of Gussasphalt Mixture Based on Modified Burgers Model: Deviation and Experimental Verification”, *Advances in Materials Science and Engineering*, t. 2017, s. 1–11, 2017.
- [133] N. I. Md. Yusoff, D. Mounier, G. Marc-Stéphane, M. Rosli Hainin, G. D. Airey, i H. Di Benedetto, „Modelling the rheological properties of bituminous binders using the 2S2P1D Model”, *Construction and Building Materials*, t. 38, s. 395–406, sty. 2013.
- [134] P. Mackiewicz, *Wpływ właściwości reologicznych mieszanek mineralno-asfaltowych na deformacje nawierzchni drogowych*. Wrocław: Wrocław University of Technology, 2001.
- [135] A. Kurpiel i A. Wysokowski, „Assessment of Impact of the Rheological Parameters Change on Sensitivity of the Asphalt Strain Based on the Test Results / Ocena Wpływu Zmiany Parametrów Reologicznych Na Wrażliwość Deformacji Mieszanek Mineralno-Asfaltowych Na Podstawie Wyników Badań”, *Civil And Environmental Engineering Reports*, t. 16, nr 1, s. 105–117, mar. 2015.
- [136] P. C. Hopman, „The visco-elastic multilayer program VEROAD”, *HERON*, t. 41, nr 4, s. 71–91, 1996.
- [137] M. F. Woldekidan, M. Huurman, i L. T. Mo, „Testing and modeling of bituminous mortar response”, *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, t. 25, nr 4, s. 637–640, sie. 2010.
- [138] W. Nowacki, *Teoria pełzania*. Arkady, 1963.
- [139] C. Tzikang, „Determining a Prony Series for a Viscoelastic Material From Time Strain Data”, *NASA, ARL-TR-226*, 2000.
- [140] S. W. Park i R. A. Schapery, „Methods of interconversion between linear viscoelastic material functions. Part I—a numerical method based on Prony series”, *International Journal of Solids and Structures*, t. 36, nr 11, s. 1653–1675, kwi. 1999.
- [141] M. Słowik, *Wybrane zagadnienia lepkosprężystości drogowych asfaltów modyfikowanych, zawierających elastomer SBS*. Poznań, 2013.
- [142] J. L. Goodrich, „Asphalt and Polymer Modified Asphalt Properties Related to the Performance of Asphalt Concrete Mixes”, zaprezentowano na *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 1988, t. 57, s. 116–175.
- [143] F. Olard i H. Di Benedetto, „The «DBN» Model: A Thermo-Visco-Elasto-Plastic Approach for Pavement Behavior Modeling”, zaprezentowano na *2005 Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Long Beach CA, United States, 2005, t. 74.
- [144] R. Blab, K. Kappl, R. Lackner, i L. Aiger, „Permanent Deformation of Bituminous Bound Materials in Flexible Pavements: Evaluation of Test Methods and Prediction Models”, *Sustainable and Advance Materials for Road InfraStructure (SAMARIS) SAM-05-D28*, 2006.

- [145] N. I. Yusoff, *Modelling the linear viscoelastic rheological properties of bituminous binders*. University of Nottingham, 2012.
- [146] E. Chailleux, G. Ramond, C. Such, i C. de La Roche, „A mathematical-based master-curve construction method applied to complex modulus of bituminous materials”, *Road Materials and Pavement Design*, t. 7, nr sup1, s. 75–92, sty. 2006.
- [147] T. O. Medani i M. Huurman, „Construction the Stiffness Master Curves for Asphaltic Mixes”, *Delf University of Technology*, Report 7-01-127-3, 2003.
- [148] J. D. Ferry, *Viscoelastic properties of polymers*, 3d ed. New York: Wiley, 1980.
- [149] G. Schmidt, „Flügge, W., *Viscoelasticity*, Berlin-Heidelberg-New York. Springer-Verlag. 1975. VII u. 194 S., 85 Abb., DM 38,-, US \$ 15.60.”, *ZAMM – Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, t. 57, nr 8, s. 498–498, 1977.
- [150] F. Riesz i B. Szökefalvi-Nagy, *Functional analysis*, Dover ed. New York: Dover Publications, 1990.
- [151] R. M. Haj-Ali i A. H. Muliana, „Numerical finite element formulation of the Schapery non-linear viscoelastic material model”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, t. 59, nr 1, s. 25–45, sty. 2004.
- [152] C.-W. Huang, R. K. Abu Al-Rub, E. A. Masad, D. N. Little, i G. D. Airey, „Numerical implementation and validation of a nonlinear viscoelastic and viscoplastic model for asphalt mixes”, *International Journal of Pavement Engineering*, t. 12, nr 4, s. 433–447, sie. 2011.
- [153] G. Chehab, „Characterization of asphalt concrete in uniaxial tension using a viscoelastoplastic continuum damage mode”, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, t. 72, s. 315–355, 2003.
- [154] M. Henriksen, „Nonlinear viscoelastic stress analysis—a finite element approach”, *Computers & Structures*, t. 18, nr 1, s. 133–139, sty. 1984.
- [155] R. Li, *Non-linear viscoelastic stress and fracture analyses of laminated composites*. Washington,: University of Washington, 1997.
- [156] G. Mazurek i M. Iwański, „Modelling of Asphalt Concrete Stiffness in the Linear Viscoelastic Region”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, t. 245, s. 032029, paź. 2017.
- [157] Ž. R. Lazić, *Design of experiments in chemical engineering: a practical guide*. Weinheim ; [Germany]: Wiley-VCH, 2004.
- [158] R. West, *Design and evaluation of high rap content asphalt mixtures*. Washington, DC: Transportation Research Board of the National Academies, 2013.
- [159] X. Li, A. Zofka, M. Marasteanu, i T. R. Clyne, „Evaluation of field aging effects on asphalt binder properties”, *Road Materials and Pavement Design*, t. 7, nr sup1, s. 57–73, sty. 2006.
- [160] M. L. Williams, „Structural analysis of viscoelastic materials”, *AIAA Journal*, t. 2, nr 5, s. 785–808, maj 1964.
- [161] H. M. R. D. Silva, J. R. M. Oliveira, J. Peralta, i S. E. Zoorob, „Optimization of warm mix asphalts using different blends of binders and synthetic paraffin wax contents”, *Construction and Building Materials*, t. 24, nr 9, s. 1621–1631, wrz. 2010.
- [162] H. U. Bahia, *National Research Council (U.S.), American Association of State Highway and Transportation Officials, i National Cooperative Highway Research*

- Program, Red., Characterization of modified asphalt binders in Superpave mix design. Washington, D.C: National Academy Press, 2001.
- [163] A. Motamed i H. U. Bahia, „Incorporating temperature into the constitutive equation for plastic deformation in asphalt binders”, *Construction and Building Materials*, t. 29, s. 647–658, kwi. 2012.
 - [164] A. Zofka i D. Nener-Plante, „Determination of Asphalt Binder Creep Compliance Using Depth-Sensing Indentation”, *Experimental Mechanics*, t. 51, nr 8, s. 1365–1377, paź. 2011.
 - [165] J. Blanc, T. Gabet, P. Horny, J.-M. Piau, i H. Di Benedetto, „Cyclic triaxial tests on bituminous mixtures”, *Road Materials and Pavement Design*, t. 16, nr 1, s. 46–69, sty. 2015.
 - [166] I. L. Hopkins i R. W. Hamming, „On Creep and Relaxation”, *Journal of Applied Physics*, t. 28, nr 8, s. 906–909, sie. 1957.
 - [167] D. W. Mead, „Numerical interconversion of linear viscoelastic material functions”, *Journal of Rheology*, t. 38, nr 6, s. 1769–1795, lis. 1994.
 - [168] N. W. Tschoegl, *The phenomenological theory of linear viscoelastic behavior: an introduction ; with 25 tables*. Berlin: Springer, 1989.
 - [169] H. U. Bahia, M. Zeng, i K. Nam, „Consideration of Strain at Failure and Strength in Prediction of Pavement Thermal Cracking”, *Journal of Asphalt Paving Technology*, t. 69, s. 467–539.
 - [170] H. Leaderman, „Viscoelasticity Phenomena in Amorphous High Polymeric Systems”, *Rheology*, t. II, 1958.
 - [171] R. M. Christensen, *Theory of viscoelasticity: an introduction*, 2nd ed. New York: Academic Press, 1982.
 - [172] G. D. Airey, B. Rahimzadeh, i A. C. Collop, „Linear Rheological Behavior of Bituminous Paving Materials”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, t. 16, nr 3, s. 212–220, cze. 2004.
 - [173] A. D. Drozdov, *Finite elasticity and viscoelasticity: a course in the nonlinear mechanics of solids*. Singapore ; River Edge, N.J: World Scientific, 1996.
 - [174] R. Steller, „Novel models of viscous liquids based on Carreau equation”, *Polimery*, t. 58, nr 11/12, s. 913–919, lis. 2013.
 - [175] Y. N. Rabotnov, *Elements of Hereditary Mechanics of Solid Bodies*. Moscow: Nauka, 1977.
 - [176] H. Leaderman, *Elastic and creep properties of filamentous materials and other high polymers*. The Textile foundation, 1943.
 - [177] A. E. Green i R. S. Rivlin, „The Mechanics of Non-Linear Materials with Memory”, w *Collected Papers of R.S. Rivlin*, G. I. Barenblatt i D. D. Joseph, Red. New York, NY: Springer New York, 1997, s. 1049–1069.
 - [178] R. A. Schapery, „On the characterization of nonlinear viscoelastic materials”, *Polymer Engineering and Science*, t. 9, nr 4, s. 295–310, lip. 1969.
 - [179] F. J. Lockett, *Nonlinear viscoelastic solids*. London, New York: Academic Press, 1972.

- [180] K. A. Patankar, Linear and Nonlinear Viscoelastic Characterization of Proton Exchange Membranes and Stress Modeling for Fuel Cell Applications. Virginia Polytechnic Institute and State University, 2009.
- [181] R. A. Schapery, A Theory of Non-linear Thermoviscoelasticity Based on Irreversible Thermodynamics. American Society of Mechanical Engineers, 1966.
- [182] R. A. Schapery, „An engineering theory of nonlinear viscoelasticity with applications”, International Journal of Solids and Structures, t. 2, nr 3, s. 407–425, lip. 1966.
- [183] L. F. Walubita, A. E. Alvarez, i G. S. Simate, „Evaluating and comparing different methods and models for generating relaxation modulus master-curves for asphalt mixes”, Construction and Building Materials, t. 25, nr 5, s. 2619–2626, maj 2011.
- [184] T. Kobayashi, T. Mikami, i M. Fujikawa, „Application of Abaqus for Advanced Inelastic Analysis (I: Linear Viscoelastic Materials)”, w Mechanical Design & Analysis Corporation, 2008.
- [185] G. Mazurek i M. Iwański, „Relaxation Modulus of SMA with Polymer Modified and Highly Polymer Modified Bitumen”, Procedia Engineering, t. 172, s. 731–738, 2017.
- [186] PN-EN 13043:2004/Ap1:2010, „Kruszywa do mieszanek bitumicznych i powierzchniowych utrwaleń stosowanych na drogach, lotniskach i innych powierzchniach przeznaczonych do ruchu”.
- [187] M. Wasilewska, D. Małaszkiwicz, i N. Ignatiuk, „Evaluation of Different Mineral Filler Aggregates for Asphalt Mixtures”, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, t. 245, s. 022042, paź. 2017.
- [188] M. I. Attia, M. A. Abdelrahman, U. Molakatalla, i H. M. Salem, „Field evaluation of asphalt film thickness as a design parameter in superpave mix design”, t. 2, s. 205–210, 2009.
- [189] B. Sengoz i E. Agar, „Effect of asphalt film thickness on the moisture sensitivity characteristics of hot-mix asphalt”, Building and Environment, t. 42, nr 10, s. 3621–3628, paź. 2007.
- [190] P. S. Kandhal, „NCAT Report 96-01 Effect of Asphalt Film Thickness on Short and Long Term Aging of Asphalt Paving Mixtures”, 2008.
- [191] S. Bressi, A. G. Dumont, i M. N. Partl, „An advanced methodology for the mix design optimization of hot mix asphalt”, Materials & Design, t. 98, s. 174–185, maj 2016.
- [192] R. Chapuis i P.-P. Legare, „Simple method for determining the surface area of fine aggregates and fillers in bituminous mixtures”, ASTM Special Technical Publication, s. 177–186, 1992.
- [193] K. Błażejowski, SMA.: teoria i praktyka. Warszawa: Rettenmaier Polska, 2007.
- [194] K. Błażejowski i S. Styk, Technologia warstw asfaltowych. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2011.
- [195] PN-EN 12697-22+A1:2008, „Mieszanki mineralno-asfaltowe -- Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco -- Część 22: Koleinowanie”.
- [196] PN-EN 12697-24, „Mieszanki mineralno-asfaltowe -- Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco -- Część 24: Odporność na zmęczenie”.

- [197] L. E. Nielsen i R. F. Landel, *Mechanical properties of polymers and composites*, 2nd ed., rev. And expanded. New York: M. Dekker, 1994.
- [198] Z. Hashin i S. Shtrikman, „A variational approach to the theory of the elastic behaviour of polycrystals”, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, t. 10, nr 4, s. 343–352, paź. 1962.
- [199] T. Yi-qiu, Z.-H. Li, X.-Y. Zhang, i Z.-J. Dong, „Research on High- and Low-Temperature Properties of Asphalt-Mineral Filler Mastic”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, t. 22, nr 8, s. 811–819, sie. 2010.
- [200] M. Robati, A. Carter, i D. Perraton, „New Conceptual Model for Filler Stiffening Effect on Asphalt Mastic of Microsurfacing”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, t. 27, nr 11, s. 04015033, lis. 2015.
- [201] B. Delaporte, H. Di Benedetto, P. Chaverot, i G. Gauthier, „Linear Viscoelastic Properties of Bituminous Materials Including New Products Made with Ultrafine Particles”, *Road Materials and Pavement Design*, t. 10, nr 1, s. 7–38, sty. 2009.
- [202] B. Stefańczyk, *Nowe metody doboru i oceny oraz uzdatniania wypełniaczy zastępczych do mas bitumicznych*. 1982.
- [203] G. Mazurek i M. Iwański, „Modelling the critical concentration of mixed filler in mastic with synthetic wax”, *MATEC Web of Conferences*, t. 262, s. 05008, 2019.
- [204] PN-EN 12591:2010, „Asfalty i lepiszcza asfaltowe -- Wymagania dla asfaltów drogowych”.
- [205] PN-EN 1426:2015-08, „Asfalty i lepiszcza asfaltowe -- Oznaczanie penetracji igłą”.
- [206] PN-EN 1427:2015-08, „Asfalty i lepiszcza asfaltowe -- Oznaczanie temperatury mięknięcia -- Metoda Pierścienia i Kula”.
- [207] PN-EN 12593:2015-08, „Asfalty i lepiszcza asfaltowe -- Oznaczanie temperatury łamliwości metodą Fraassa”.
- [208] PN-EN 933-10:2002, „Badania geometrycznych właściwości kruszyw -- Część 10: Ocena zawartości drobnych cząstek -- Uziarnienie wypełniaczy (przesiewanie w strumieniu powietrza)”.
- [209] R. Gradziński, A. Kostecki, A. Radomski, i R. Unrug, *Zarys sedymentologii*, Wydawnictwo geologiczne. Warszawa, 1986.
- [210] D. A. Anderson, „Dust collectors fines and their influence on mixture design”, *ATP*, t. 51, 1982.
- [211] PN-EN 1097-7:2008, „Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw -- Część 7: Oznaczanie gęstości wypełniacza -- Metoda piknometryczna”.
- [212] P. Buczyński, *Wpływ pyłów powstałych w procesie odpylania kruszywa na właściwości podbudowy z asfaltem spienionym*. Wydział Budownictwa i Architektury: Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, 2012.
- [213] P. S. Kandhal, „Evaluation of baghouse fines for hot mix asphalt”, *National Asphalt Pavement Association*, 1999.
- [214] A. Grzybowski, „Kryteria oceny przydatności wypełniaczy do mieszanek mineralno-asfaltowych”, *Drogownictwo*, nr 1, s. 25–28, 2001.
- [215] PN-EN 13179-1:2013-10, „Badania kruszyw wypełniających stosowanych do mieszanek bitumicznych -- Część 1: Badanie metodą pierścienia delta i kuli”.

- [216] PN-EN 13179-2:2002, „Badania kruszyw wypełniających stosowanych do mieszanek bitumicznych -- Część 2: Liczba bitumiczna”.
- [217] PN-EN 196-6:2010, „Metody badania cementu -- Część 6: Oznaczanie stopnia zmielenia”.
- [218] PN-EN 14770:2012, „Asfalty i lepiszcza asfaltowe -- Oznaczanie zespolonego modułu ścinania i kąta przesunięcia fazowego -- Reometr dynamicznego ścinania (DSR)”.
- [219] H. Di Benedetto i C. de La Roche, „State of art of stiffness modulus and fatigue of bituminous mixtures”, London, RILEM 17.
- [220] S. Biro, T. Gandhi, i S. Amirkhanian, „Determination of zero shear viscosity of warm asphalt binders”, *Construction and Building Materials*, t. 23, nr 5, s. 2080–2086, maj 2009.
- [221] CEN/TS 15325:2008, „Bitumen and bituminous binders - Determination of Zero-Shear Viscosity (ZSV) using a Shear Stress Rheometer in creep mode”.
- [222] G. Mazurek i M. Iwański, „Estimation of Zero Shear Viscosity Versus Rutting Resistance Parameters of Asphalt Concrete”, *Procedia Engineering*, t. 161, s. 30–35, 2016.
- [223] „PN-EN 16659:2016-02: Asfalty i lepiszcza asfaltowe -- Badanie cyklicznego pełzania z odprężeniem (MSCRT)”. PKN, 2016.
- [224] AASHTO TP 70, „Standard Method of Test for Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)”.
- [225] D. A. Anderson, „Understanding the MSCR Test and its Use in the PG Asphalt Binder Specyfication”, zaprezentowano na Asphalt Intitute presentation, 2011.
- [226] K. Błażejowski i B. Dołycki, „The relationships between asphalt mix rutting resistance and MSCR test results”, zaprezentowano na Design, Analysis and Asphalt Material Characterization for Road and Airfield Pavements, 2014, s. 202–209.
- [227] P. Shirodkar, Y. Mehta, A. Nolan, K. Dahm, R. Dusseau, i L. McCarthy, „Characterization of creep and recovery curve of polymer modified binder”, *Construction and Building Materials*, t. 34, s. 504–511, wrz. 2012.
- [228] P. Mackiewicz i A. Szydło, „Effect of load repeatability on deformation resistance of bituminous mixtures in creep and rutting tests”, *Archives of Civil Engineering*, t. Vol. 49, nr 1, s. 35–51, 2003.
- [229] G. Mazurek i M. Iwański, „Modelowanie wartości granicznej wypełniacza mieszanego w mastyksie z woskiem syntetycznym”, zaprezentowano na 64. Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej oraz Komitetu Nauki PZITB, Krynica, 2018.
- [230] A. Stanisław i R. Tadeusiewicz, *Przystępny kurs statystyki z zastosowaniem STATISTICA PL na przykładach z medycyny*. T. 2, T. 2., Kraków: StatSoft, 2007.
- [231] PN-EN 459-1:2012, „Wapno budowlane -- Część 1: Definicje, wymagania i kryteria zgodności”.
- [232] M. Iwański, P. Buczyński, i G. Mazurek, „Optimization of the road binder used in the base layer in the road construction”, *Construction and Building Materials*, t. 125, s. 1044–1054, paź. 2016.

- [233] Iwański M., Chomicz-Kowalska A., Buczyński P., Mazurek G., Cholewińska M., Iwański M.M., Ramiączek P., Maciejewski K., „Procedury projektowania oraz wytyczne stosowania materiałów odpadowych i z recyklingu do technologii wytwarzania mieszanek metodą na zimno z asfaltem spienionym (MCAS)”, Politechnika Świętokrzyska, Kielce, Wytyczne do Raportu RID-I/6, zadanie 5. NCBiR, GDD-KiA., 2018.
- [234] F. Navarro i M. García-Morales, „The use of waste polymers to modify bitumen”, *Polymer Modified Bitumen*, s. 98–135, 2011.
- [235] D. Sybilski, J. Matras, T. Mechowski, i J. Zawadzki, „Warunki techniczne wykonywania warstw podbudowy z mieszanki mineralno cementowo-emulsyjnej (MCE). Wydanie II uzupełnione. Informacje, instrukcje. Zeszyt 61”. IBDiM, 1999.
- [236] J. Kusiak, A. Danielewska-Tulecka, i P. Oprocha, *Optymalizacja: wybrane metody z przykładami zastosowań*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2009.
- [237] H. Benker, *Practical Use of Mathcad®: Solving Mathematical Problems with a Computer Algebra System*. London: Springer London : Imprint : Springer, 1999.
- [238] M. W. Witzcak, Red., *Simple performance test for Superpave mix design*. Washington, D.C: National Academy Press, 2002.
- [239] W. Grabowski i J. Wilanowicz, „The structure of mineral fillers and their stiffening properties in filler-bitumen mastics”, *Materials and Structures*, t. 41, nr 4, s. 793–804, maj 2008.
- [240] S. E. Zoorob, J. P. Castro-Gomes, i L. A. Pereira Oliveira, „Assessing low shear viscosity as the new bitumen Softening Point test”, *Construction and Building Materials*, t. 27, nr 1, s. 357–367, luty 2012.
- [241] J. Lai i A. Bakker, „An integral constitutive equation for nonlinear plastoviscoelastic behavior of high-density polyethylene”, *Polymer Engineering and Science*, t. 35, nr 17, s. 1339–1347, wrz. 1995.
- [242] A. Gawęcki, *Mechanika materiałów i konstrukcji prętowych*. T. 1 T. 1. Poznań: Wydaw. Politechniki Poznańskiej, 1998.
- [243] A. Bodnar, *Wytrzymałość materiałów: podręcznik dla studentów wyższych szkół technicznych*. Kraków: Politechnika Krakowska, 2004.
- [244] H. Poon i M. F. Ahmad, „A finite element constitutive update scheme for anisotropic, viscoelastic solids exhibiting non-linearity of the Schapery type”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, t. 46, nr 12, s. 2027–2041, grudz. 1999.
- [245] T. F. Soules, R. F. Busbey, S. M. Rekhson, A. Markovsky, i M. A. Burke, „Finite-Element Calculation of Stresses in Glass Parts Undergoing Viscous Relaxation”, *Journal of the American Ceramic Society*, t. 70, nr 2, s. 90–95, luty 1987.
- [246] J. E. Soussou, F. Moavenzadeh, i M. H. Gradowczyk, „Application of Prony Series to Linear Viscoelasticity”, *Transactions of The Society of Rheology*, t. 14, nr 4, s. 573–584, 1970.
- [247] S. Saadeh, *Characterization of asphalt concrete using anisotropic damage viscoelastic-viscoplastic model*. Texas A&M University, 2007.

- [248] K. Manda, R. J. Wallace, S. Xie, F. Levrero-Florencio, i P. Pankaj, „Nonlinear viscoelastic characterization of bovine trabecular bone”, *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*, t. 16, nr 1, s. 173–189, luty 2017.
- [249] T. L. J. Wasage, J. Stastna, i L. Zanzotto, „Rheological analysis of multi-stress creep recovery (MSCR) test”, *International Journal of Pavement Engineering*, t. 12, nr 6, s. 561–568, grudz. 2011.
- [250] D. C. Montgomery, *Design and analysis of experiments*, Eighth edition. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc, 2013.
- [251] A. Stanisławski, *Przystępny kurs statystyki z zastosowaniem STATISTICA PL na przykładach z medycyny*. Kraków: StatSoft Polska, 2007.
- [252] C. F. Popelar i K. M. Liechti, „A Distortion-Modified Free Volume Theory for Nonlinear Viscoelastic Behavior”, *Mechanics of Time- Dependent Materials*, t. 7, s. 89–141, 2003.
- [253] W. G. Knauss i I. J. Emri, „Nonlinear Viscoelasticity Based on Free Volume Consideration”, *Computers and Structures*, t. 13, s. 123–128, 1981.
- [254] „Going to Extremes”, zaprezentowano na Meeting the Emerging Demand for Durable Polymer Matrix Composites, National Research Council: Committee on Durability and Life Prediction of Polymer Matrix Composites in Extreme Environments, 2005.
- [255] D. Jańczewski, C. Różycki, i L. Synoradzki, *Projektowanie procesów technologicznych: matematyczne metody planowania eksperymentów*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2010.
- [256] G. Mazurek i M. Iwański, „Multidimensional Analysis of the Effects of Waste Materials on Physical and Mechanical Properties of Recycled Mixtures with Foamed Bitumen”, *Applied Sciences*, t. 8, nr 2, s. 282, luty 2018.

STRESZCZENIE

Liniowa i nieliniowa lepkosprężysta charakterystyka mastyksu asfaltowego w zakresie wysokich temperatur eksploatacyjnych nawierzchni

Niniejsza praca obejmowała badania i analizy nieliniowego stanu naprężenia i odkształcenia mastyksu z wykorzystaniem różnych wypełniaczy mineralnych w zakresie wysokich temperatur eksploatacyjnych. W pracy skoncentrowano się na identyfikacji parametrów nieliniowego modelu ośrodka lepkosprężystego opartego na teorii Schapery'ego. Zastosowanie modelu nieliniowej lepkosprężystości pozwala na ewaluację stanu odkształcenia mastyksu w zakresie takich czynników jak: temperatura, czas obciążenia, i co najważniejsze – poziomu wysokiego naprężenia. Z faktu, że odkształcenia w mastyksie są wielokrotnie wyższe niż w mma, to aplikacja niniejszego modelu jest najbardziej racjonalnym podejściem do analizy fenomenologicznej mastyksu jako efektywnego lepiszcza w mma. Do realizacji zamierzonego celu zaproponowano zmodyfikowany program pomiaru odkształcenia w trybie kontrolowanego naprężenia oznaczony jako procedura MMSCR. Opracowano algorytm numeryczny mający na celu prognozę stanu odkształcenia mastyksu w zależności od rodzaju wypełniacza. W następstwie tych działań wykazano związki korelacyjne pomiędzy funkcją wiążącą parametry nieliniowej funkcji lepkosprężystości a właściwościami wypełniacza. W pracy przedstawiono dokładność oraz stabilność uzyskanych wyników. Jako dopełnienie całego procesu analitycznego zaproponowano model pozwalający na szybkie i miarodajne określenie maksymalnej ilości wypełniacza w mastyksie.

SUMMARY

Linear and non-linear characteristic of the asphalt mastic in range of high pavement operational temperatures

This dissertation included analysis and test results on non-linear state of stress and strain of the mastic using various mineral fillers in the range of high operating temperatures. In this work was focused on identifying parameters of a non-linear model of a viscoelastic medium on the basis of non-linear Schapery's theory. The use of the non-linear viscoelasticity model allows evaluation of the mastic strain state in terms of: temperature, loading time and the most important – high stress level. Due to the fact that the deformation in the asphalt mastic is many times higher than in the MMA, the application of this model is the most rational approach to the phenomenological analysis of the mastics being an effective binder in MMA. To achieve the intended purpose, a modified loading procedure was proposed carried out under controlled stress mode designated as an MMSCR procedure. A numerical algorithm has been developed to predict the deformation state of asphalt mastic depending on the type of filler. As a result, correlation relationships between the linked function of the non-linear viscoelastic function parameters and filler properties have been demonstrated. The work presents the accuracy and stability of the obtained results as well. As a complement to the entire analytical process, additional model was proposed that allows a quick and reliable determination of the critical amount of filler in the mastic.