

УДК 625.168  
UDK 625.168

DOI:10.33744/0365-8171-2024-115.2-163-169

**ВИЗНАЧЕННЯ АДГЕЗІЇ БІТУМУ ДО ЗОЛИ ВИНЕСЕННЯ****DETERMINATION OF ADHESION OF BITUMEN TO FLYING ASH**

*Соколов О. В., завідувач лабораторії випробувань матеріалів відділу матеріалів Центру досліджень розвитку та утримання об'єктів інфраструктури ДП "НІПІ", Київ, Україна  
e-mail: [bitumen\\_lab@ukr.net](mailto:bitumen_lab@ukr.net)*

<https://orcid.org/0000-0002-4694-9647>

**Анотація.** В Україні близько 30% всієї електроенергії виробляється від спалювання твердого палива - вугілля, сланцю, торфу. В нашій країні налічується близько 15 діючих ТЕС на яких вторинним продуктом утворюється близько 5-6 млн. тон золошлакових відходів в рік. Таким чином, відходи паливно-енергетичного комплексу, що утворюються в топках теплових електростанцій, являють собою величезні скупчення золи у вигляді пилоподібних залишків і кускового шламу, а також різні золошлакові суміші. Ці продукти високотемпературної обробки (1200-1700 °С) мінеральної частини палива, знайшли широке застосування в багатьох країнах світу і враховуючи світову тенденцію, до збільшення частки вторинного ринку використання відходів, слід прогнозувати підвищення темпів їх переробки і в Україні.

В Україні як наповнювач використовують переважно матеріал, отриманий подрібненням карбонатних гірських порід, що встановлено в національних стандартах. В той же час на електрогенеруючих підприємствах України в результаті спалювання вугілля утворюються мільйони тон пилоподібних відходів – золи винесення. Даний матеріал за показниками наближається до вимог до наповнювача згідно з національного стандарту та може бути використаний для виробництва асфальтобетонних сумішей.

Під час досліджень використовували золи винесення різного походження та вапняковий мінеральний порошок Скало-Подільського спец кар'єру .

**Ключові слова.** мінеральний порошок, зола винесення, екологія, адгезія, бітум, асфальтов'язуче.

**Вступ.** Постійне зростання обсягів будівництва автомобільних доріг у сучасному світі вимагає пошуку економічно та екологічно збалансованих рішень щодо використання матеріалів. Одним з основних матеріалів для влаштування монолітних шарів дорожнього одягу є асфальтобетонні суміші. Збільшення попиту на ці суміші призводить до важливого питання щодо джерел їх складників. У

цьому контексті використання побічних продуктів промисловості для вироблення асфальтобетонних сумішей стає актуальним та стратегічно важливим аспектом сучасної будівельної індустрії.

Одним з складників асфальтобетонних сумішей є наповнювач, який використовують для покращення механічних властивостей та довговічності асфальтобетону. Одним із типів наповнювачів є карбонатні мінеральні порошки, які широко використовують не тільки дорожньому будівництві, а і в інших будівельних галузях. [1]

Адгезійна властивість бітуму є дуже важливою його характеристикою, оскільки воно має вирішальне значення для забезпечення багатьох експлуатаційних властивостей композитних матеріалів на основі бітуму. Всім відомо, що взаємний зв'язок та зчеплення мінеральних частинок, що утворюють асфальтобетон, відбувається завдяки внутрішньому тертю між ними та внаслідок склеювання їх бітумом у місцях взаємного з'єднання. Призначення бітуму полягає, насамперед, у склеюванні мінеральних складових асфальтобетону. Крім того, бітум обволікає мінеральні частинки тонкою бітумною плівкою, і, заповнюючи порожнечі між ними, перешкоджає проникненню вологи в асфальтобетон, надаючи мінеральним частинкам гідрофобні властивості. Волога вибірково змочує відкриту поверхню мінерального матеріалу, прагне проникнути крізь плівку бітуму та витіснити її з поверхні мінерального матеріалу. При недостатній адгезії бітум відшаровується та оголює мінеральні частинки. Зміщення плівки полегшується під час руху води, наприклад в умовах струшування. У цьому випадку до впливу води приєднується механічне тертя бітумованих частинок між собою та воду. З підвищенням температури зменшується в'язкість бітуму та полегшується відрив його від поверхні частинок. При температурі кипіння води в'язкість бітуму ще більше знижується, крім того, при русі полегшується проникнення води через дефектні місця плівки і дифузія її крізь плівку, а також посилюється механічне тертя частинок. Для оцінки зчеплення мінерального матеріалу та бітуму було визначено показники зчеплення методом визначення довготривалого водонасичення.

**Виклад основного матеріалу.** У роботах [57–64] описували метод визначення адгезійної активності сумішей, суть якого полягає в оцінці ступеню зниження міцності при стиску зразків суміші мінеральних порошків з сировини різного походження з бітумом після насичення водою. За величину коефіцієнта водостійкості приймали відношення показника міцності при стиску зразків після насичення їх водою в умовах вакууму і наступного витримання в гарячій воді до показника міцності при стиску не водонасичених зразків.

Для визначення необхідної кількості бітуму у співвідношенні до маси мінерального порошку при заданому показнику залишкової пористості послідовно проектували склади сумішей. Для проведення випробувань готували суміші різного складу, послідовно змінюючи вміст бітуму. З кожного запроєктованого складу суміші мінерального порошку з різною кількістю бітуму формували по три зразки для кожного складу сумішей. Не раніше ніж через добу після виготовлення зразків визначали їх середню густину, водонасичення, залишкову пористість та встановлювали вміст бітуму за якого залишкова пористість становила від 5 % до 6 %. Після чого виготовляли шість зразків із запроєктованим вмістом бітуму. Перші три зразки піддавали визначенню середньої густини, залишкової пористості та міцності за температури 20 °С на 15 день після виготовлення, наступні три зразки піддавали визначенню середньої густини, залишкової пористості, водонасичення, витриманню у воді впродовж 14 днів та визначенню міцності за температури 20 °С. За отриманими результатами встановлювали коефіцієнт водостійкості.

Результати випробування наведено в таблицях 1 – 4.

**Таблиця 1** – Результати визначення властивостей асфальтов’яжучого із наповнювачем з вапняку

**Table 1** – Results of determining the properties of asphalt binder with limestone filler

Ч. ч.	Найменування показника	Результати випробування		
1	Очевидна густина мінерального порошку, г/см <sup>3</sup>	2,631	2,631	2,631
2	Очевидна густина бітуму, г/см <sup>3</sup>	1,016	1,016	1,016
3	Середня густина ущільненої суміші, г/см <sup>3</sup>	2,053	2,064	2,068
4	Вміст наповнювача, %	100	100	100
5	Вміст бітуму (в 100 %), %	11,50	13,04	15,25
6	Дійсна густина мінеральної частини, г/см <sup>3</sup>	2,631	2,631	2,631
7	Середня густина мінеральної частини, г/см <sup>3</sup>	1,817	1,795	1,753
8	Дійсна густина суміші, г/см <sup>3</sup>	2,224	2,179	2,118
9	Пористість мінеральної частини, % за об’ємом	30,95	31,78	33,39
10	Залишкова пористість, % об’ємом	7,70	5,29	2,34
11	Кількість пор, заповнених в’яжучим, % за об’ємом	23,2	26,5	31,0
12	Кількість пор, заповнених в’яжучим, %	75,1	83,4	93,0
13	Водонасичення, % об’ємом	6,90	4,40	1,10
14	Пористість мінеральної частини, % за об’ємом (ДСТУ EN)	30,95	31,78	33,39
15	Різниця між залишковою пористістю та водонасичення, %	0,80	0,89	1,24

**Таблиця 2** – Результати визначення властивостей асфальтов’яжучого із наповнювачем з Золи-винесення Бурштинської ТЕС

**Table 2** – Results of determining the properties of asphalt binder with filler from fly ash of the Burshtyn TPP

Ч. ч.	Найменування показника	Результати випробування		
1	Очевидна густина мінерального порошку, г/см <sup>3</sup>	2,602	2,602	2,602
2	Очевидна густина бітуму, г/см <sup>3</sup>	1,016	1,016	1,016
3	Середня густина ущільненої суміші, г/см <sup>3</sup>	2,023	2,038	2,049
4	Вміст наповнювача, %	100	100	100
5	Вміст бітуму (в 100 %), %	11,50	13,04	15,25
6	Дійсна густина мінеральної частини, г/см <sup>3</sup>	2,602	2,602	2,602
7	Середня густина мінеральної частини, г/см <sup>3</sup>	1,790	1,772	1,736
8	Дійсна густина суміші, г/см <sup>3</sup>	2,206	2,162	2,102
9	Пористість мінеральної частини, % за об’ємом	31,20	31,89	33,27
10	Залишкова пористість, % об’ємом	8,29	5,73	2,50
11	Кількість пор, заповнених в’яжучим, % за об’ємом	22,9	26,2	30,8
12	Кількість пор, заповнених в’яжучим, %	73,4	82,0	92,5
13	Водонасичення, % об’ємом	7,40	4,70	1,30
14	Пористість мінеральної частини, % за об’ємом (ДСТУ EN)	31,20	31,89	33,27
15	Різниця між залишковою пористістю та водонасичення, %	0,89	1,03	1,20

**Таблиця 3** – Результати визначення властивостей асфальтов’яжучого із наповнювачем з золи-винесення Дарницької ТЕС

**Table 3** – Results of determining the properties of asphalt binder with filler from fly ash of Darnytsia TPP

Ч. ч.	Найменування показника	Результати випробування		
1	Очевидна густина мінерального порошку, г/см <sup>3</sup>	2,689	2,689	2,689
2	Очевидна густина бітуму, г/см <sup>3</sup>	1,016	1,016	1,016
3	Середня густина ущільненої суміші, г/см <sup>3</sup>	2,071	2,082	2,092
4	Вміст наповнювача, %	100	100	100
5	Вміст бітуму (в 100 %), %	11,50	13,04	15,25
6	Дійсна густина мінеральної частини, г/см <sup>3</sup>	2,689	2,689	2,689
7	Середня густина мінеральної частини, г/см <sup>3</sup>	1,833	1,810	1,773
8	Дійсна густина суміші, г/см <sup>3</sup>	2,261	2,214	2,149
9	Пористість мінеральної частини, % за об’ємом	31,84	32,67	34,07
10	Залишкова пористість, % об’ємом	8,39	5,94	2,66
11	Кількість пор, заповнених в’яжучим, % за об’ємом	23,5	26,7	31,4
12	Кількість пор, заповнених в’яжучим, %	73,6	81,8	92,2
13	Водонасичення, % об’ємом	7,50	4,90	1,40
14	Пористість мінеральної частини, % за об’ємом (ДСТУ EN)	31,84	32,67	34,07
15	Різниця між залишковою пористістю та водонасичення, %	0,89	1,04	1,26

**Таблиця 4** – Результати визначення властивостей асфальтов’яжучого із наповнювачем з золи-винесення Трипільської ТЕС

**Table 4** – Results of determination of properties of asphalt binder with filler from fly ash of Trypil TPP

Ч. ч.	Найменування показника	Результати випробування		
1	Очевидна густина мінерального порошку, г/см <sup>3</sup>	2,671	2,671	2,671
2	Очевидна густина бітуму, г/см <sup>3</sup>	1,016	1,016	1,016
3	Середня густина ущільненої суміші, г/см <sup>3</sup>	2,023	2,028	2,031
4	Вміст наповнювача, %	100	100	100
5	Вміст бітуму (в 100 %), %	11,50	13,04	15,25
6	Дійсна густина мінеральної частини, г/см <sup>3</sup>	2,671	2,671	2,671
7	Середня густина мінеральної частини, г/см <sup>3</sup>	1,790	1,763	1,721
8	Дійсна густина суміші, г/см <sup>3</sup>	2,249	2,203	2,139
9	Пористість мінеральної частини, % за об’ємом	32,97	33,98	35,56
10	Залишкова пористість, % об’ємом	10,07	7,94	5,07
11	Кількість пор, заповнених в’яжучим, % за об’ємом	22,9	26,0	30,5
12	Кількість пор, заповнених в’яжучим, %	69,5	76,6	85,8
13	Водонасичення, % об’ємом	9,50	7,30	4,10
14	Пористість мінеральної частини, % за об’ємом (ДСТУ EN)	32,97	33,98	35,56
15	Різниця між залишковою пористістю та водонасичення, %	0,57	0,64	0,97

Результати випробування показали, що тип наповнювача впливає на об’ємні властивості виготовлених зразків.

Так, необхідне значення залишкової пористості під час використання наповнювача із вапняку досягається при вмісті бітуму 15,0 % та становить 5,29 % за об'ємом. У випадку використання наповнювача із золи-винесення Бурштинської ТЕС та золи-винесення Дарницької ТЕС необхідне значення залишкової пористості також досягається при вмісті бітуму 15,0 % однак вони є вищими та становлять відповідно 5,73 % та 5,94 % за об'ємом. За використання наповнювача з золи-винесення Трипільської ТЕС для досягнення необхідної залишкової пористості необхідно використовувати 18,0 % бітуму, при цьому значення залишкової пористості становить 5,07 % за об'ємом.

**Таблиця 5** – Результати визначення водостійкості ущільнених сумішей

**Table 5** – Results of determination of water resistance of compacted mixtures

	Наповнювач			
	Вапняк	Зола-винесення Бурштинської ТЕС	Зола-винесення Дарницької ТЕС	Зола винесення Трипільської ТЕС
Водостійкість, %	0,96	0,95	0,93	0,94

За коефіцієнтом водостійкості наповнювачі можна розмістити в такому порядку – з вапняку, золи-винесення Бурштинської ТЕС, золи-винесення Дарницької ТЕС, золи-винесення Трипільської ТЕС. Відповідно значення коефіцієнта водостійкості становлять 0,96, 0,95, 0,93 та 0,94.

**Висновки.** Проаналізувавши результати водостійкості зразків із суміші наповнювача та бітуму, можна оцінити адгезію бітуму до мінерального порошку за зміною коефіцієнта водостійкості.

Тобто, зола винесення практично не поступається стандартному вапняковому наповнювачу. За рахунок використання золи винесення можна здешевити складі асфальтобетонної суміші, що призводить до зниження вартості асфальтобетону, а також зменшити кількість відходів від електрогенеруючих підприємств.

#### Перелік посилань

1. Соколов О.В. Дослідження властивостей зол-виносу різного походження на відповідність національним вимогам . Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2023. Вип. 113.2. С. 82-89. DOI: 10.33744/0365-8171-2023-113.2-082-089
2. Nasir, N.H.M.; Usman, F.; Saggaf, A. Development of composite material from Recycled Polyethylene Terephthalate and fly ash: Four decades progress review. Curr. Res. Green Sustain. Chem. 2022, 5, 100280 <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2022.100280>
3. Norhaiza, G.; Khairunisa, M.; Saffuan, W.A. Utilization of Fly Ash in Construction. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2019, 601, 012023 DOI 10.1088/1757-899X/601/1/012023
4. Bieliatynskiy, A.; Yang, S.; Pershakov, V.; Shao, M.; Ta, M. The use of fiber made from fly ash from power plants in China in road and airfield construction. Constr. Build. Mater. 2022, 323, 126537 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126537>
5. Muhammad, J.; Peng, T.; Zhang, W.; Cheng, H.; Waqas, H.; Abdul, S.; Chen, K.; Zhou, Y. Moisture susceptibility and fatigue performance of asphalt binder modified by bone glue and coal fly ash. Constr. Build. Mater. 2021, 308, 125135 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125135>

6. Radwan, A.; Satar, M.; Hassan, N.; Rogo, K. The Influence of Coal Fly Ash on the Mechanical Properties of Hot Mix Asphalt Mixture. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science; IOP Publishing: Bristol, UK, 2022; p. 012012 DOI 10.1088/1755-1315/971/1/012012
7. Chaira; Veranita. The Effect of Combining Coal Fly Ash and Lokan Shells as Filler Towards the Mixture of Asphalt Concrete Wearing Course. In Journal of Physics: Conference Series; IOP Publishing: Bristol, UK, 2020; p. 012033 DOI 10.1088/1742-6596/1625/1/012033
8. Amoni, B.C.; Freitas, A.D.L.; Bessa, R.A.; Oliveira, C.P.; Bastos-Neto, M.; Azevedo, D.C.S.; Lucena, S.M.P.; Sasaki, J.M.; Soares, J.B.; Soares, S.A.; et al. Effect of coal fly ash treatments on synthesis of high-quality zeolite A as a potential additive for warm mix asphalt. Mater. Chem. Phys. 2022, 275, 125197 <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.125197>
9. Apostolidis, Panos & Xueyan, Liu & Marocho, Paul & Ven, Martin & Erkens, Sandra & Skarpas, Tom. (2020). Evaluation of epoxy modification in asphalt mastic. Materials and Structures. DOI:10.1617/s11527-020-01494-9

### DETERMINATION OF ADHESION OF BITUMEN TO FLYING ASH

**Alexei Sokolov**, head of the material testing laboratory of the materials department of the Research Center for the Development and Maintenance of Infrastructure Facilities of SE "NIRI" e-mail: bitumen\_lab@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-4694-9647>

**Summary.** In Ukraine, about 30% of all electricity is produced by burning solid fuels - coal, shale, and peat. In our country, there are about 15 operating thermal power plants, which generate about 5-6 million tons of ash and slag waste as a secondary product per year. Thus, the waste of the fuel and energy complex, which is formed in the furnaces of thermal power plants, is a huge accumulation of ash in the form of dust-like residues and lumpy sludge, as well as various ash-slag mixtures. These products of high-temperature processing (1200-1700 °C) of the mineral part of the fuel are widely used in many countries of the world, and taking into account the global trend of increasing the share of the secondary market for the use of waste, it is necessary to predict an increase in the rate of their processing in Ukraine as well.

**Problems.** In Ukraine, as a filler, the material obtained by crushing carbonate rocks is used as a filler, which is established in DSTU B B.2.7-121. At the same time, as a result of burning coal, millions of tons of dust-like waste - fly ash - are generated at power-generating enterprises of Ukraine. In terms of indicators, this material approaches the requirements for filler according to DSTU B V.2.7-121 and can be used for the production of asphalt concrete mixtures.

**The purpose of the work** is to compare the adhesive activity of different fillers by the method of determining water resistance.

**Materials and methods.** During the research, fly ash of various origins and mineral powder of limestone from the Skalo-Podilskyi special quarry were used.

**The results.** It has been established that the adhesive activity of bitumen with fly ash practically does not change the adhesive properties of bitumen with limestone filler.

**Conclusions.** Due to the use of fly ash, it is possible to reduce the price of asphalt concrete mixtures, which will lead to a decrease in the cost of asphalt concrete, as well as reduce the amount of waste from electricity generating enterprises

**Keywords.** *mineral powder, ash removal, ecology, adhesion, bitumen, asphalt binder.*

**References**

1. Sokolov O.V. Research on the properties of fly ash of various origins for compliance with national requirements. Roads and road construction. 2023. Issue 113.2. P. 82-89. DOI: 10.33744/0365-8171-2023-113.2-082-089
2. Nasir, N.H.M.; Usman, F.; Saggaf, A. Development of composite material from Recycled Polyethylene Terephthalate and fly ash: Four decades progress review. Curr. Res. Green Sustain. Chem. 2022, 5, 100280 <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2022.100280>
3. Norhaiza, G.; Khairunisa, M.; Saffuan, W.A. Utilization of Fly Ash in Construction. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2019, 601, 012023 DOI 10.1088/1757-899X/601/1/012023
4. Bieliatynskiy, A.; Yang, S.; Pershakov, V.; Shao, M.; Ta, M. The use of fiber made from fly ash from power plants in China in road and airfield construction. Constr. Build. Mater. 2022, 323, 126537 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126537>
5. Muhammad, J.; Peng, T.; Zhang, W.; Cheng, H.; Waqas, H.; Abdul, S.; Chen, K.; Zhou, Y. Moisture susceptibility and fatigue performance of asphalt binder modified by bone glue and coal fly ash. Constr. Build. Mater. 2021, 308, 125135 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125135>
6. Radwan, A.; Satar, M.; Hassan, N.; Rogo, K. The Influence of Coal Fly Ash on the Mechanical Properties of Hot Mix Asphalt Mixture. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science; IOP Publishing: Bristol, UK, 2022; p. 012012 DOI 10.1088/1755-1315/971/1/012012
7. Chaira; Veranita. The Effect of Combining Coal Fly Ash and Lokan Shells as Filler Towards the Mixture of Asphalt Concrete Wearing Course. In Journal of Physics: Conference Series; IOP Publishing: Bristol, UK, 2020; p. 012033 DOI 10.1088/1742-6596/1625/1/012033
8. Amoni, B.C.; Freitas, A.D.L.; Bessa, R.A.; Oliveira, C.P.; Bastos-Neto, M.; Azevedo, D.C.S.; Lucena, S.M.P.; Sasaki, J.M.; Soares, J.B.; Soares, S.A.; et al. Effect of coal fly ash treatments on synthesis of high-quality zeolite A as a potential additive for warm mix asphalt. Mater. Chem. Phys. 2022, 275, 125197 <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.125197>
9. Apostolidis, Panos & Xueyan, Liu & Marocho, Paul & Ven, Martin & Erkens, Sandra & Skarpas, Tom. (2020). Evaluation of epoxy modification in asphalt mastic. Materials and Structures. DOI:10.1617/s11527-020-01494-9.

*Дата надходження до редакції 15.07.2024.*