

УДК 625.168

Соколов О. В., <https://orcid.org/0000-0002-4694-9647>

Желтобрюх А. Д., <https://orcid.org/0000-0003-0764-8793>

Копинець І. В., <https://orcid.org/0000-0002-0908-4795>

Каськів В. І., канд. техн. наук, доц., <https://orcid.org/0000-0002-8074-6798>

Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П. Шульгіна» (ДП «ДерждорНДІ»), м. Київ, Україна

ВИКОРИСТАННЯ ВІДХОДІВ ПРОМИСЛОВОСТІ В ДОРОЖНЬОМУ БУДІВНИЦТВІ

Анотація

Вступ. Утилізація вторинних матеріалів виробництва призначена для збереження природних ресурсів і скорочення обсягу відходів, які необхідно утилізувати в спеціальних місцях поховання. Утилізація дуже заохочується багатьма країнами Європейського Союзу, в якому є відповідні положення у всіх директивах, що стосуються управління відходами. Ключовим елементом у заохоченні до переробки відходів є принцип «забруднювач платить», який був включений до всіх директив Співтовариства щодо поводження з безпечними та небезпечними відходами. З метою заохочення до переробки багато держав-членів прийняли специфічне екологічне законодавство, зокрема, сплату податку за утилізацію відходів.

Проблематика. В умовах ринкової економіки та недостатнього фінансування дорожньої галузі, екологічних проблем та виснаження природних ресурсів, першочерговим завданням є використання відходів промисловості в будівництві доріг при цьому забезпечивши експлуатаційну надійність шарів дорожніх одягів, а також здійснення заходів спрямованих на ресурсо- та енергозбереження. В Україні передбачається можливим поряд з природними матеріалами в якості сировини використовувати відходи промисловості, до яких відносять металургійні шлаки, золу-винесення з ТЕС, вторинний поліетилен і гумову крихту.

Мета. Виконати аналіз існуючого досвіду використання відходів промисловості в дорожньому будівництві для подальшого впровадження і підвищення екологічної безпеки та експлуатаційних характеристик дорожніх одягів за рахунок нових дорожньо-будівельних матеріалів.

Матеріали і методи. Аналіз інформаційних джерел і досвіду щодо використання відходів промисловості в дорожньому будівництві та дослідження вимог до матеріалів та їх складу.

Результати. Проведено аналітичний огляд досвіду використання відходів промисловості в дорожньому будівництві. Вивчено та проаналізовано різні матеріали, встановлені вимоги до матеріалів, їх гранулометричного складу, вмісту в бітумі та асфальтобетонній суміші.

Висновки. Аналізом інформаційних джерел щодо використання відходів промисловості в дорожньому будівництві встановлено, що їх використовують у повному обсязі в різних країнах світу і в більшості випадків у дорожньому будівництві. Було встановлено, що використання різних відходів під час будівництва автомобільних доріг є життєздатним варіантом, який потребує подальшого вивчення.

Ключові слова: асфальтобетонна суміш, бітум, вторинний поліетилен, гумова крихта, зола-винесення, шлак.

Вступ

Утилізація вторинних матеріалів виробництва призначена для збереження природних ресурсів і скорочення обсягу відходів, які необхідно утилізувати в спеціальних місцях поховання. Утилізація дуже заохочується багатьма країнами Європейського Союзу, в якому є відповідні положення у всіх директивах, що стосуються управління відходами. Ключовим елементом у заохоченні до переробки відходів є принцип «забруднювач платить», який був включений до всіх директив Співтовариства щодо поводження з безпечними та небезпечними відходами. З метою заохочення до переробки багато держав-членів прийняли специфічне екологічне законодавство, зокрема, сплату податку за утилізацію відходів.

Утилізація вторинних матеріалів у дорожньому будівництві є поширеною практикою у більшості країн. У Європейському Союзі велика кількість вторинних матеріалів була використана в дорожніх проектах, це такі матеріали як: доменний і сталеплавильний шлак, зола від теплових електростанцій, матеріали від зносу будівель або ремонту доріг, гумова крихта — продукт переробки автомобільних шин, вторинний поліетилен — будь-який матеріал із широкого спектру синтетичних або напівсинтетичних речовин тощо.

Слід зазначити, що попри лояльне відношення багатьох держав до використання відходів промисловості деякі матеріали не знаходять місце в дорожньому будівництві.

У Данії сталеплавильні шлаки та золу-винесення повністю використовують під час виробництва асфальтобетонних сумішей. Аналогічної політики також дотримується Фінляндія. У США лише 10 % щорічного виробництва шлаків викидається в навколишнє середовище, більшість із них використовують у всіх сферах дорожнього будівництва. В Японії відходи промисловості утилізують у дорожньому та цивільному будівництві, а в деяких випадках і створюють новий матеріал для подальшого використання.

Найбільша перешкода для використання вторинних матеріалів у будівництві пов'язана із негативними властивостями деяких матеріалів, які потенційно можуть негативно впливати на довкілля, наприклад: доменний шлак та золашлак може бути радіоактивний. Але це не є сталим показником для більшості вторинних матеріалів.

В Україні на теперішній час не вирішено питання утилізації відходів промисловості, тому більше 90 % знаходяться у відвалах та несуть в собі великий ризик для екології, і тільки до 10 % утилізується в будівельних проектах, хоча вже існує «Державна цільова економічна програма розвитку автомобільних доріг загального користування державного значення на 2018–2022 роки», яка регламентує використання місцевих матеріалів, включаючи відходи виробництва промисловості в будівництві.

Основна частина

Використання золи-винесення

Зола-винесення — один із залишків, що утворюються при спалюванні вугілля. Складається з мікродисперсних часток, що піднімаються разом із димовими газами. Один з основних забруднювачів, які походять від горіння.

Дослідженням можливості використання золи-винесення займалися різні дослідники [1–3]. Кар отримав результати, що засвідчили більшу стабільність асфальтобетонних зразків при поєднанні золи-винесення з цементом [1].

У роботі [2] вапняковий порошок було замінено на золу виносу в кількості 50 % та 100 %. У результаті було отримано результати, що засвідчили поліпшення стійкості асфальтобетону до постійної деформації.

У роботі [3] було показано, що часткова заміна мінерального порошку золою-винесення дозволяє на 7,5 % зменшити оптимальний вміст бітуму в щільних щебневих сумішах, оброблених бітумом («бітумний макадам»).

У 2015 році Н. Ж. Маданбеков та Б. Ж. Осмонова провели дослідження з використання золи-винесення для заміни мінерального порошку в асфальтобетонній суміші [4]. За результатами проектування суміші відповідно до AASHTO T 245 було встановлено, що міцність асфальтобетону із золою-винесення не відрізняються від асфальтобетону з традиційним мінеральним порошком. Експериментальні дослідження показали доцільність використання цього матеріалу в складі асфальтобетону, що дозволяє створити реальні умови для економії таких дефіцитних матеріалів, як мінеральний порошок.

Використання вторинного поліетилену

Вторинний поліетилен є дешевим продуктом переробки відходів виробів з поліетилену: сільськогосподарської плівки, плівкової тари, оболонки телефонного кабелю тощо.

В Іспанії та інших західноєвропейських країнах для підвищення температури розм'якшеності та еластичності бітумів, що вміщують термопласти на основі поліетилену (ЕВА) використовують більш дорогі термоеластоласти типу СБС.

У роботі [5] було вивчено можливість використання сумішей різних відходів полімерів для модифікації бітумів. Перевірялась лише зміна в'язкості та температури розм'якшеності. Встановлено, що модифікація бітуму 6 % суміші вторинного поліетилену та полімеру ЕВА (2:4) дозволяє отримати в'язуче, з penetрацією за температури 25 °С — 95·0,1 мм та температурою розм'якшеності 70 °С, що наближається до бітуму, модифікованого 5 % СБС. При модифікації бітуму сумішшю полімерів, яка складається з 4 % СБС та 3 % вторинного поліетилену було отримано в'язуче, що при тій же в'язкості має температуру розм'якшеності, яка не поступається температурі розм'якшеності бітуму, модифікованого 5 % СБС (72 °С).

Професор Веренько А. А. [6] з метою зниження вартості модифікованого бітуму досліджував можливість використання кондиційного термопласту на основі поліетилену для часткової заміни більш дорогого термоеластопласту. Замість 5 % термоеластопласту було запропоновано вводити у бітум 5 % суміші термоеластопласту та вторинного поліетилену у співвідношенні 1:3. При цьому висловлено думку, що ефект від суміщення в якому-небудь середовищі двох полімерів буде значно вищим, ніж цього можна очікувати за правилами сумішей. Це відбувається за рахунок утворення міжфазних переходів в шарах, які обумовлюють особливі властивості сумішей. У Білорусі також проводились дослідження з метою визначення доцільності використання порошкоподібних відходів переробки старих кабелів — суміші вторинного поліетилену та каучуків для модифікації асфальтобетонів. Асфальтобетон на основі бітуму, модифікованого 5 % та 7 % відходів, мав у 2 рази більшу міцність на стиск за температури 50 °С, ніж звичайний без зниження опору низькотемпературному розтріскуванню. При введенні відходу в кількості 1 % від маси мінеральної частини безпосередньо в асфальтобетонну суміш отримано збільшення міцності на стиск за температури 50 °С у 1,7 рази. Аналіз наведеної інформації свідчить про можливість зниження вартості модифікованих бітумів шляхом використання вторинного поліетилену.

У роботі [7] при дослідженні впливу вторинного поліетилену на властивості асфальтобетону було встановлено, що при введенні поліетилену зменшується пористість і водонасичення асфальтобетону, покращуються міцнісні показники. Аналогічні результати було отримано в роботі [8]. Дослідженнями [9] встановлено, що вторинний поліетилен в кількості від 5 % до 11 % може бути використано для модифікації бітуму марки 60/70.

При дослідженні впливу вторинного поліетилену в кількості від 1,0 % до 5,0 % було встановлено, що найкращі результати отримано при вмісті вторинного поліетилену 4 %, про що

засвідчили результати визначення стабільності асфальтобетонних зразків за Маршалом [10].

Рокдей [11] показав що, вторинний поліетилен збільшує температуру розм'якшеності бітуму, а також дозволяє збільшити строк експлуатації дорожнього покриття із використанням його в якості в'язучого.

Проведені випробування з визначення міцності за Маршалом для різного вмісту бітуму та вторинного поліетилену засвідчили зменшення пористості та водонасичення, а результати підвищеної міцності та теплостійкості дозволяють прогнозувати збільшення довговічності за рахунок меншого старіння [12–17].

Використання гумової крихти

Гумову крихту отримують шляхом подрібнення автомобільних шин до розміру від 0,63 мм до 1,0 мм. Її можна використовувати під час будівництва автомобільних доріг та для заміни звичайних будівельних матеріалів, серед переваг її використання відмічають покращені дренажні властивості та хорошу теплоізоляцію [18, 19].

Найбільш економічно-ефективні розробки було виконано із застосуванням асфальтобетонних сумішей, модифікованих гумовою крихтою [20]. Додавання гумової крихти можна виконувати безпосередньо в гарячий бітум (вологий процес) або в суміш (сухий процес). Наприклад, у [21] показано значне поліпшення в'язкопружних характеристик і в'язкості бітуму в порівнянні з вихідним бітумом, як результат, отримано кращу стійкість до постійної деформації. Будівництво дороги повинно бути швидким, оскільки може відбутися осідання частинок гумової крихти у в'язучому.

Позитивний досвід використання гумової крихти ліг в основу створення Мандату законодавчого органу штату Каліфорнія щодо використання асфальтобетонних сумішей, модифікованих гумовою крихтою у кількості 35 % від маси бітуму. Міністерство транспорту Каліфорнії вирішило використовувати асфальтобетонні суміші, модифіковані гумовою крихтою, для влаштування шару покриття. Використання гумової крихти дозволяє зменшити товщину шару вдвічі. Це пояснюється покращеними характеристиками втоми та тріщиностійкості асфальтобетону, що, у свою чергу, приводить до значного зменшення викидів CO₂ під час будівництва та на етапі технічного обслуговування впродовж строку служби автомобільної дороги. Додатковою перевагою використання гумової крихти в покритті є зниження шуму. Використання гумової крихти приводить до приглушення генерованих коливань від взаємодії шин і дорожнього покриття, які є домінуючими механізмами шуму від взаємодії шина-дорога [22].

У роботі [23] показано, що додавання гумової крихти в асфальтобетонну суміш зменшує обсяг дрібного заповнювача та збільшує гнучкість і міцність на вигин шару покриття автомобільних доріг. Гумову крихту було використано для заміни дрібного заповнювача аналогічного розміру, щоб зберегти заданий гранулометричний склад. За результатами випробування було встановлено, що найкращі результати мають суміші з 5 % та 10 % гумової крихти.

Під час введення гумової крихти зменшується penetрація бітуму тим більше, чим більше вміст гумової крихти. Зменшення penetрації свідчить про збільшення в'язкості бітуму, надаючи додаткової міцності дорозі та зменшує пористість. Найбільшою перевагою використання бітуму, модифікованого гумовою крихтою, є те, що тривалість експлуатації дороги збільшується порівняно зі звичайним бітумом, тоді як зростання витрат на експлуатацію дороги зменшуються [24].

Використання шлаків

Шлак — металургійний розплав, що зазвичай покриває поверхню рідкого металу при металургійних процесах — плавці сировини, обробці розплавлених проміжних продуктів і рафінуванні металів. Є сплавом оксидів змінного складу; головні компоненти шлаку — кислотний

оксид SiO_2 і основні оксиди CaO , FeO , MgO , а також нейтральні Al_2O_3 і ZnO .

Шлак з успіхом використовують у дорожньому будівництві. Наприклад, шари дорожнього покриття, що складаються з шлаку доменної печі (BF) та киснево-конвертерного сталеплавильного шлаку (BO) зазвичай застосовують у таких країнах Європи як Англія та Франція, також широко використовують шлаки з електричної дугової печі (EAF), які отримують після певного промислового виробничого процесу [25–29].

У роботі [30] оцінено експлуатаційні характеристики асфальтобетонів із шлаком EAF, які продемонстрували задовільні показники щодо зчеплення та шорсткості поверхні.

Проведені дослідження щодо часткової та повної заміни природних заповнювачів на шлаки у складі пористих та щобенево-мастикових асфальтобетонів показали, що асфальтобетонні суміші, виготовлені зі шлаком, придатні для влаштування асфальтобетонних покриттів. [31, 32].

В Україні застосування щобеневих матеріалів із шлаків металургійних визначається їх властивостями. Відповідно до пункту 11.1 ДСТУ Б В.2.7-30 щобеневі матеріали може бути використано під час влаштування покриття, шарів основи, додаткових шарів основи, вирівнювання поверхні шарів основи дорожнього одягу на автомобільних дорогах загального користування методом заклинки або із сумішей. При цьому, влаштування покриття із щобеневих матеріалів можливе на автомобільних дорогах IV–V категорії, а шарів основи — I–V категорії.

Висновки

Використання різних відходів під час будівництва автомобільних доріг є життєздатним варіантом, який потребує подальшого вивчення. Рівень технічної готовності серед досліджуваних матеріалів сильно відрізняється.

Характерним прикладом є застосування гумової крихти, а також законодавчо, наприклад, у Каліфорнії США, де ця технологія є технічно розвинутою та підтримана законодавчо на відміну від Франції, Італії та Іспанії, де є перешкода у її використанні через місцеве національне законодавство, а іноді і недостатню довіру до наукових досліджень. Хоча результати досліджень свідчать, що додавання гумової крихти в асфальтобетонні суміші зменшує кількість природного заповнювача за об'ємом і збільшує міцність на згин. Це не тільки мінімізує забруднення навколишнього середовища, але й зменшує використання природних заповнювачів.

Вторинний поліетилен покращує властивості бітуму та асфальтобетону, підвищує його стійкість, а також зменшує пористість і водонасичення. Золу-винесення використовують, зокрема для заміни мінеральному порошку в асфальтобетонних сумішах. Властивості отриманих асфальтобетонів такі як і в традиційних асфальтобетонах при збільшенні густини та зменшенні водонасичення.

Також перспективним матеріалом для влаштування як незв'язних шарів дорожнього одягу, так і оброблених в'язчими, є металургійний шлак. Використання шлаку дозволить значно знизити використання природних заповнювачів і зменшити негативний вплив на навколишнє середовище.

Список літератури

1. Kar Debashish et al. Influence of Fly Ash as a Filler in Bituminous Mixes. *ARPN Journal of Engineering and applied sciences*. 2014. N 9. P. 895-900. URL: http://www.arpnjournals.com/jeas/research_papers/rp_2014/jeas_0614_1117.pdf (дата звернення: 20.04.2020).
2. Kumar Ajoy & Kumar Chhotu Anil. Experimental Investigation of Bituminous Mixes Using Fly Ash as Filler Material. *Journal of Civil Engineering and Environmental Technology*. 2016. N 1. P. 4-6.
3. Misty Raja & Kumar Roy tapas. Effect of Using Fly Ash as Alternative Filler in Hot Mix

Asphalt. *Perspectives in science*. 2016. P. 307-309. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pisc.2016.04.061> (дата звернення: 20.04.2020).

4. Маданбеков Н.Ж., Осмонова Б.Ж. Минеральные порошки из вторичных продуктов ТЭЦ г. Бишкек в составе асфальтобетонных покрытий. *Известия национальной академии наук Кыргызской Республики*. 2012. № 4. С. 64-66.

5. Merfy M., O'Mahony M. C. Lycet, I. Jamieson. Bitumens modified with recycled polymers. *Materials and Structures*. 2000. № 33. P. 438-444. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02480663> (дата звернення 20.04.2020).

6. Веренько В.А. Новые материалы в дорожном строительстве: учеб. пособ. Минск, 2004. 170 с.

7. Soni Kapil & Punjabi K.K. Improving the Performance of Bituminous Concrete Mix by Waste Plastic. *International Journal of Engineering Research and Application*. 2013. N 3. P. 863-868. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.644.7797&rep=rep1&type=pdf> (дата звернення: 20.04.2020).

8. Santosh Yadav et al. Performance Evaluation of Waste Plastic and Bitumen Concrete mix in Flexible Pavements. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. Chhattisgarh, 2013. N 4 (10). P. 398-406.

9. Kazami Sukaina & Govardhana Rao Dubasi. Utilization of Waste Plastic Material as Bitumen - Blends for Road Construction in Oman. *Scholars Journal of Engineering and Technology*. 2015. P. 9-13.

10. Soyal Pradeep Use of Waste Polythene in Bituminous Concrete Mixes. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2015. N 2. P. 1114-1116.

11. Rokdey Shweta N et al. Use of Plastic Waste in Road Construction. *International conference on Quality Up- gradation in Engineering Science and Technology*. P 27-29.

12. Dawale S.A. Use of Waste Plastic Coated Aggregate in Bituminous Road Construction. *International Journal of Advancement in Engineering Technology Management and Applied Science*. 2016. N 3. P. 118-126.

13. Rajput Pratiksha Singh & Yadav R. K. Use of Plastic Waste in Bituminous Road Construction. *International Journal of Science Technology & Engineering*. 2016. N 2. P. 509-513.

14. Hassani A., Ganjidoust H., Maghanaki A.A. Use of plastic waste (poly-ethylene terephthalate) in asphalt concrete mixture as aggregate replacement. *Waste Management & Research*. 2005. N 23. P. 322-327. DOI: <https://doi.org/10.1177/0734242X05056739> (дата звернення 20.04.2020).

15. Moghaddam T.B., Karim M.R., Syammaun T. Dynamic properties of stone mastic asphalt mixtures containing waste plastic bottles. *Construction and Building Materials*. 2012. N 34. P. 236-242.

16. Moghaddam T.B., Soltani M., Karim M.R. Evaluation of permanent deformation characteristics of unmodified and Polyethylene Terephthalate modified asphalt mixtures using dynamic creep test. *Mater. Des.* 2014. N 53. P. 317-324.

17. Rahman, W.M.N.W.A., Wahab, A.F.A. Green pavement using recycled polyethylene terephthalate (PET) as partial fine aggregate replacement in modified asphalt. *Malaysian Technical Universities Conference on Engineering & Technology 2012, MUCET 2012*. 2013. P. 124-128. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.02.018> (дата звернення 20.04.2020).

18. F. Canestrari, E. Pasquini, F. A. Santagata, I. Antunes *Asphalt Conference*. Portugal, 2000. P. 978-989.

19. Sousa J.B. *Editor of the Proceedings of the Asphalt Rubber 2012 Conference*. Germany. 2012. P. 978-989.

20. Dondi G., Tataranni P., Pettinari M., Sangiorgi C., Simone A., Vignali V. Crumb rubber in cold recycled bituminous mixes: comparison between traditional crumb rubber and cryogenic crumb rubber. *Construction and Building Materials*. 2014. 68. P. 370-375.

21. Liang M., Xin X., Fan W., Luo H., Wang X., Xing B. Investigation of the rheological properties and storage stability of CR/SBS modified asphalt. *Construction and Building Materials*. 2015. N 74. P. 235-240. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.022> (дата звернення 20.04.2020).
22. Bueno M., Luong J., Teran F., Vinuela U., Paje S.E. 2014. Macrotecture influence on vibrational mechanisms of the tyre/road noise of an asphalt rubber pavement. *Int. J. Pavement Eng.* 2015. N 15. P. 606-613. DOI: <https://doi.org/10.1080/10298436.2013.790547> (дата звернення: 20.04.2020).
23. Baraiya Niraj D. Use of Waste Rubber Tyres in Construction of Bituminous Road - An Overview. *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management*. 2013. N 2. P. 108-110. URL: <https://www.ijaiem.org/volume2issue7/IJAIEM-2013-07-10-028.pdf> (дата звернення: 20.04.2020).
24. Deshmukh Nitu H. & Kshirsagar Prof. D. Y. Utilization of Rubber Waste in Construction of Flexible Pavement. *International Journal of Advance Research and Development*. 2017. N 2 (7). URL: <https://www.ijarnd.com/manuscripts/v2i7/V2I7-1170.pdf> (дата звернення: 20.04.2020).
25. Dunster A.M. The use of blastfurnace slag and steel slag as aggregates. *Proceedings of the Fourth European Symposium on Performance of Bituminous and Hydraulic Materials in Pavements, Bitmat 4*. Nottingham, 2017. P. 257-260
26. Rockliff D., Moffett A., Thomas N. Recent developments in the use of steel slag aggregates in asphalt mixtures in the UK. *Proceedings of the 4th European Symposium on Performance of Bituminous and Hydraulic Materials in Pavements*. Nottingham, 2002. 5 p.
27. Pascal S., Jan-Erik L., Maria A., Paul F.K. Reproducing ten years of road ageing - accelerated carbonation and leaching of EAF steel slag. *International Journal of Highway Engineering*. 2009. N 17 (1). P. 25-33 DOI : <https://doi.org/10.7855/IJHE.2015.17.1.025> (дата звернення: 20.04.2020).
28. Morone M., Costa G., Poletini A., Pomi R., Baciocchi R. Valorization of steel slag by a combined carbonation and granulation treatment. *Mineral Engineering*. 2014. N 59. P. 82-90.
29. Ellis C. Performance and durability aspects of asphalts incorporating electric arc furnace steel slag aggregates designed for use in thin pavement surfaces. *Proceedings of the 3rd European Symposium on Performance and Durability of Bituminous Materials and Hydraulic Stabilized Composites*. Leeds, 1999. P. 221-238.
30. Liapis I., Likoydis S. Use of electric arc furnace slag in thins skid-resistant surfacing. Transport research areana. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 2012. N 48, P. 907-918. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.06.1068> (дата звернення: 20.04.2020).
31. Cannone Falchetto A., Moon K.H. Remarks on the use of electric arc furnace (EAF) steel slag in asphalt mixtures for flexible pavements. *International Journal of Highway Engineering*. 2015. 17 (1), P. 25-33.
32. Grönniger J., Wistuba M.P., Cannone Falchetto A. Reuse of Linz-Donawitz (LD) slag in asphalt mixtures for pavement application. *Proceedings of the Interantional Conference on Industrial Wasted and Wastewater Treatment & Valorization, Athens*. 2015. P. 21-23. URL: https://pdfs.semanticscholar.org/3760/a08d57d8058cd7d6c24e42da1cb5e553c38c.pdf?_ga=2.220735583.638416509.1589892831-1047910380.1589892831 (дата звернення: 20.04.2020).

References

1. Kar Debashish et al. Influence of Fly Ash as a Filler in Bituminous Mixes. *ARPJ Journal of Engineering and applied sciences*. N 9. 2014, P. 895-900. URL: http://www.arpnjournals.com/jeas/research_papers/rp_2014/jeas_0614_1117.pdf (Last accessed: 20.04.2020) [in English].
2. Kumar Ajoy & Kumar Chhotu Anil. Experimental Investigation of Bituminous Mixes Using

Fly Ash as Filler Material. *Journal of Civil Engineering and Environmental Technology*. 2016. N 1. P. 4-6.

3. Misty Raja & Kumar Roy tapas. Effect of Using Fly Ash as Alternative Filler in Hot Mix Asphalt. *Perspectives in science*. 2016. P. 307-309. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pisc.2016.04.061> (Last accessed: 20.04.2020) [in English].

4. Madanbekov N.Zh., Osmonova B.Zh. Mineralnyye poroshki iz vtorychnykh produktov TETs g. Bishkek v sostave asfaltobetonnykh pokrytiy (Mineral powders from the secondary products of Bishkek thermal power plants in the composition of asphalt concrete coatings). *Kyrgyz SSR ilimder akademiâsynyn kabarlary*. 2012. № 4. P. 64-66. [in Russian].

5. Merfy M., O'Mahony M. C. Lycet, I. Jamieson. Bitumens modified with recycled polymers. *Materials and Structures*. 2000. № 33. P. 438-444. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02480663> (Last accessed: 20.04.2020) [in English].

6. Verenko V.A. Novyye materialy v dorozhnom stroitelstve (New materials in road construction): tutorial. Minsk. 2004. 170 p. [in Russian].

7. Soni Kapil & Punjabi K.K. Improving the Performance of Bituminous Concrete Mix by Waste Plastic. *International Journal of Engineering Research and Application*. 2013. N 3. P. 863-868. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.644.7797&rep=rep1&type=pdf> (Last accessed: 20.04.2020) [in English].

8. Santosh Yadav et al. Performance Evaluation of Waste Plastic and Bitumen Concrete mix in Flexible Pavements. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. Chhattisgarh, 2013. N 4 (10). P. 398-406. [in English].

9. Kazami Sukaina & Govardhana Rao Dubasi. Utilization of Waste Plastic Material as Bitumen - Blends for Road Construction in Oman. *Scholars Journal of Engineering and Technology*. 2015. P. 9-13. [in English].

10. Soyal Pradeep Use of Waste Polythene in Bituminous Concrete Mixes. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2015. N 2. P. 1114-1116. [in English].

11. Rokdey Shweta N et al. Use of Plastic Waste in Road Construction. *International conference on Quality Up- gradation in Engineering Science and Technology*. P 27-29. [in English].

12. Dawale S.A. Use of Waste Plastic Coated Aggregate in Bituminous Road Construction. *International Journal of Advancement in Engineering Technology Management and Applied Science*. 2016. N 3. P. 118-126. [in English].

13. Rajput Pratiksha Singh & Yadav R. K. Use of Plastic Waste in Bituminous Road Construction. *International Journal of Science Technology & Engineering*. 2016. N 2. P. 509-513. [in English].

14. Hassani A., Ganjidoust H., Maghanaki A.A. Use of plastic waste (poly-ethylene terephthalate) in asphalt concrete mixture as aggregate replacement. *Waste Management & Research*. 2005. N 23. P. 322-327. DOI: <https://doi.org/10.1177/0734242X05056739> (Last accessed: 20.04.2020) [in English].

15. Moghaddam T.B., Karim M.R., Syammaun T. Dynamic properties of stone mastic asphalt mixtures containing waste plastic bottles. *Construction and Building Materials*. 2012. N 34. P. 236-242.

16. Moghaddam T.B., Soltani M., Karim M.R. Evaluation of permanent deformation characteristics of unmodified and Polyethylene Terephthalate modified asphalt mixtures using dynamic creep test. *Mater. Des.* 2014. N 53. P. 317-324. [in English].

17. Rahman, W.M.N.W.A., Wahab, A.F.A. Green pavement using recycled polyethylene terephthalate (PET) as partial fine aggregate replacement in modified asphalt. *Malaysian Technical Universities Conference on Engineering & Technology 2012, MUCET 2012*. 2013. P. 124-128. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.02.018> (Last accessed: 20.04.2020) [in English].

18. F. Canestrari, E. Pasquini, F. A. Santagata, I. Antunes *Asphalt Conference*. Portugal, 2000. P. 978-989. [in English].

19. Sousa J.B. *Editor of the Proceedings of the Asphalt Rubber 2012 Conference*. Germany. 2012. P. 978-989. [in English].
20. Dondi G., Tataranni P., Pettinari M., Sangiorgi C., Simone A., Vignali V. Crumb rubber in cold recycled bituminous mixes: comparison between traditional crumb rubber and cryogenic crumb rubber. *Construction and Building Materials*. 2014. 68. P. 370-375. [in English].
21. Liang M., Xin X., Fan W., Luo H., Wang X., Xing B. Investigation of the rheological properties and storage stability of CR/SBS modified asphalt. *Construction and Building Materials*. 2015. 74. P. 235-240. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.022> (Last accessed: 20.04.2020) [in English].
22. Bueno M., Luong J., Teran F., Vinuela U., Paje S.E. 2014. Macrotecture influence on vibrational mechanisms of the tyre/road noise of an asphalt rubber pavement. *Int. J. Pavement Eng.* 2015. 15. P. 606-613. DOI: <https://doi.org/10.1080/10298436.2013.790547> (Last accessed: 20.04.2020) [in English].
23. Baraiya Niraj D. Use of Waste Rubber Tyres in Construction of Bituminous Road - An Overview. *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management*. 2013. N 2. P. 108-110. URL: <https://www.ijaiem.org/volume2issue7/IJAIEM-2013-07-10-028.pdf> (Last accessed: 20.04.2020) [in English].
24. Deshmukh Nitu H. & Kshirsagar Prof. D. Y. Utilization of Rubber Waste in Construction of Flexible Pavement. *International Journal of Advance Research and Development*. 2017. N 2 (7). URL: <https://www.ijarnd.com/manuscripts/v2i7/V2I7-1170.pdf> (Last accessed: 20.04.2020) [in English].
25. Dunster A.M. The use of blastfurnace slag and steel slag as aggregates. *Proceedings of the Fourth European Symposium on Performance of Bituminous and Hydraulic Materials in Pavements, Bitmat 4*. Nottingham, 2017. P. 257-260. [in English].
26. Rockliff D., Moffett A., Thomas N. Recent developments in the use of steel slag aggregates in asphalt mixtures in the UK. *Proceedings of the 4th European Symposium on Performance of Bituminous and Hydraulic Materials in Pavements*. Nottingham, 2002. 5 p. [in English].
27. Pascal S., Jan-Erik L., Maria A., Paul F.K. Reproducing ten years of road ageing - accelerated carbonation and leaching of EAF steel slag. *International Journal of Highway Engineering*. 2009. N 17 (1). P. 25-33 DOI : <https://doi.org/10.7855/IJHE.2015.17.1.025> (Last accessed: 20.04.2020) [in English].
28. Morone M., Costa G., Poletini A., Pomi R., Baciocchi R. Valorization of steel slag by a combined carbonation and granulation treatment. *Mineral Engineering*. 2014. N 59. P. 82-90. [in English].
29. Ellis C. Performance and durability aspects of asphalts incorporating electric arc furnace steel slag aggregates designed for use in thin pavement surfaces. *Proceedings of the 3rd European Symposium on Performance and Durability of Bituminous Materials and Hydraulic Stabilized Composites*. Leeds, 1999. P. 221-238. [in English].
30. Liapis I., Likoydis S. Use of electric arc furnace slag in thins skid-resistant surfacing. Transport research areana. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 2012. N 48, P. 907-918. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.06.1068> (Last accessed: 20.04.2020) [in English].
31. Cannone Falchetto A., Moon K.H. Remarks on the use of electric arc furnace (EAF) steel slag in asphalt mixtures for flexible pavements. *International Journal of Highway Engineering*. 2015. 17 (1), P. 25-33. [in English].
32. Grönniger J., Wistuba M.P., Cannone Falchetto A. Reuse of Linz-Donawitz (LD) slag in asphalt mixtures for pavement application. *Proceedings of the Interantional Conference on Industrial Wasted and Wastewater Treatment & Valorization, Athens*. 2015. P. 21-23. URL: https://pdfs.semanticscholar.org/3760/a08d57d8058cd7d6c24e42da1cb5e553c38c.pdf?_ga=2.220735583.638416509.1589892831-1047910380.1589892831 (Last accessed: 20.04.2020) [in English].

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

Anton Zheltobriukh, <https://orcid.org/0000-0003-0764-8793>

Ivan Kopynets, <https://orcid.org/0000-0002-0908-4795>

Volodymyr Kaskiv, Ph.D., Associate Prof., <https://orcid.org/0000-0002-8074-6798>

M.P. Shulgin State Road Research Institute State Enterprise – DerzhdorNDI SE, Kyiv, Ukraine

USE OF INDUSTRIAL WASTE IN ROAD CONSTRUCTION

Abstract

Introduction. Recycling of secondary production materials is intended to conserve natural resources and reduce the amount of waste that must be disposed of in special landfills. Recycling is very much encouraged in many European Union countries, which have relevant provisions in all waste management directives. A key element in the promotion of waste recycling is the ‘polluter pays’ principle, which has been incorporated into all Community directives on the management of safe and hazardous waste. In order to promote recycling, many Member States have adopted specific environmental legislation, in particular the payment of waste tax.

Problem statement. In a market economy and underfunding of the road industry, environmental problems, including industry and depletion of natural resources, are of primary importance for the use of industrial wastes in road construction, while ensuring the operational reliability of layers of road clothing, as well as implementing resource- and energy-efficient measures. In Ukraine, along with natural materials, industrial waste is used as raw materials, which include metallurgical slag, TPP ash, plastic and rubber crumbs.

Purpose. Perform an analysis of existing experience in the use of industrial waste in road construction for the further introduction and improvement of operational safety and operational characteristics of road surfaces of Ukraine at the expense of new road construction materials.

Materials and methods. Analysis of information sources and experience on the use of industrial waste in road construction and study of material requirements and composition of such mixtures.

Results. An analytical review of the experience of using industrial waste in road construction has been carried out. Various materials have been studied and analyzed, requirements for the use of materials, particle size, bitumen content and asphalt mix have been established.

Conclusions. The analysis of information sources on the use of waste in the road construction industry shows that industrial waste is used in full in various countries of the world and in most cases in road construction. The use of various wastes on the roads has been found to be a viable option that needs further study.

Keywords: asphalt concrete mix, bitumen, recycled polyethylene, rubber crumb, fly ash, slag.