

УДК 691.32

**ОСОБЛИВО ДРІБНОЗЕРНИСТИЙ БЕТОН ІЗ ВІДХОДІВ ГЗК
ДЛЯ БУДІВЕЛЬНИХ ВИРОБІВ**

Д-р техн. наук А. А. Пługін, інж. В. М. Чайка,
аспіранти С. М. Мусієнко, Е. Ф. Наджафов

**EXTRA FINE-GRAINED CONCRETE FROM WASTE OF MINING CONCENTRATION
PLANT FOR CONSTRUCTION PRODUCTS**

Dr.Sc. (Tech.) A. A. Plugin, engineer V. M. Chaika,
graduate students S. M. Musienko, E. F. Najafov

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.208.2024.308196>



Анотація. Виконано теоретичне обґрунтування отримання особливо дрібнозернистого бетону (ОДБ) із хвостів Полтавського гірничо-збагачувального комбінату як дрібнозернистого заповнювача. Обґрунтовано його структуру з урахуванням контактів між зернами заповнювача кутастої форми, доведено можливість підвищення міцності уведенням мінеральних наповнювачів і мікронаповнювачів із частинками розміром, меншим у п'ять разів, ніж зерна заповнювача і частинки цементу відповідно. Обґрунтовано визначення складу ОДБ із хвостів Полтавського ГЗК шляхом визначення і забезпечення оптимальної величини коефіцієнта розсунення зерен заповнювача цементним тістом із включенням до нього

пилуватих фракцій заповнювача. Визначено та експериментально підтверджено оптимальний склад ОДБ з обов'язковим застосуванням добавки суперпластифікатора – полікарбоксилату або сульфонафталінформальдегіду. Експериментально досліджено залежності міцності на стиск і розтяг ОДБ від виду і вмісту добавок-суперпластифікаторів, відношення вмісту заповнювача до вмісту цементу, вмісту мікрокремнезему, тиску пресування. Встановлено, що за однакового вмісту заповнювача та В/Ц міцність ОДБ на хвостах ГЗК перевищує міцність дрібнозернистого бетону на природному особливо дрібнозернистому піску у два рази і досягає у віці 28 діб 35 МПа. Уведення мікрокремнезему дає змогу ще підвищити міцність на стиск на 44 %. Вироби з ОДБ запропоновано формувати пошаровим пресуванням за тиску пресування 12 МПа.

Ключові слова: відходи гірничо-збагачувальних комбінатів (ГЗК), особливо дрібнозернистий бетон (ОДБ), гранулометричний склад заповнювачів, мікронаповнювач, мікрокремнезем, суперпластифікатор.

Abstract. The theoretical substantiation of the production of especially fine-grained concrete (EFC) from the waste of the Poltava Mining Concentration Plant as a fine-grained aggregate has been performed. Its structure is substantiated taking into account the contacts between the angular aggregate grains, the possibility of increasing strength by introducing mineral fillers and microfillers with particles 5 times smaller than the aggregate grains and cement particles, respectively, is proved. The determination of the composition of EFC from the waste of the Poltava MCP was substantiated by determining and ensuring the optimal value of the coefficient of displacement of aggregate grains by cement paste $\mu_{opt} = 1.89$ with the inclusion of dusty fractions of the aggregate. The optimal composition of EFC Aggregate : Cement : Water = (3–3.15):1:0.5 with mandatory use of superplasticizer additive to ensure W/C = 0.5 was determined and experimentally confirmed. The dependences of compressive and tensile strength of EFC on: type and content of superplasticizer additives were experimentally investigated; ratio of aggregate content to cement content; microsilica content; pressing pressure. It was established that the maximum strength of EFC is achieved in the case of the use of superplasticizers: polycarboxylate 1.5 % or sulfonaphthalin formaldehyde 1 % by weight of cement. It was also established that with the same A:C = 3:1 and W/C = 0.5, the strength of EFC on the waste of Poltava MCP exceeds the strength of fine-grained concrete on natural, especially fine-grained sand: in compression - by 2 times, in tension - by 1.9 times and reaches 35 MPa at the age of 28 days. The addition of microsilica in the amount of up to 15 % of the mass of cement allows to further increase the compressive strength by 44 %, and the tensile strength by 20 %. It is proposed to form EFC products by layer-by-layer pressing with a layer thickness of 5 mm. It was experimentally established that the maximum strength is achieved at a pressing pressure of 12 MPa.

Keywords: waste from mining concentration plants, extra fine-grained concrete, particle size distribution of aggregates, microfiller, microsilica, superplasticizer.

Вступ. У шламонакопичувачах гірничо-збагачувальних комбінатів (ГЗК) накопичена велика кількість відходів збагачення руд – хвостів, пустої породи, що видобувається разом із рудою та відділяється від неї. На території тільки Полтавського ГЗК таких відходів близько 450 млн м³. Їх використання для виробництва будівельних матеріалів і виробів є

привабливим через безкоштовність, а також можливість звільнення великих площ сільськогосподарських земель, на яких вони накопичені.

Відходи ГЗК за дисперсністю відповідають заповнювачам для дрібнозернистих бетонів. Порівняно зі звичайними бетонами дрібнозернисті бетони мають низку особливостей і переваг,

які можуть визначити галузі їх застосування, недосяжні для звичайних бетонів. За відсутності крупного заповнювача вони мають більш однорідні структуру та властивості [1], краще модифіковані дисперсним армуванням, можуть бути армовані сітками з дуже дрібними комірками, що даватиме змогу виробляти тонкостінні полегшені конструкції для складних архітектурно-конструктивних рішень –багатошарових, ребристих, просторових [2].

Проте дрібнозернисті бетони мають і недоліки, основним із яких є висока водопотреба, яка потребує збільшених витрат цементу [3]. У свою чергу відходи ГЗК неоднорідні, що ускладнює створення уніфікованих підходів до розроблення складів дрібнозернистого бетону [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Незважаючи на зазначений недолік, дрібнозернисті бетони дуже популярні в сучасних дослідників. Долаючи цей недолік, деякі автори намагаються знижувати витрати клінкера, використовуючи малоклінкерні шлакопортландцемент [5], композиційний цемент [6], замінюючи частину дрібного заповнювача пуцоланово активними золюю [7], туфом [8], іншими неорганічними дисперсними відходами [9]. У роботі [3] витрати води та В/Ц знижені за рахунок уведення добавок-суперпластифікаторів, а в роботах [2, 3, 8, 10] міцність підвищено за рахунок додавання фібри. Більшість зазначених робіт виключно емпіричні. Лише автори робіт [5, 6] намагаються підвищувати фізико-механічні властивості дрібнозернистого бетону на основі аналізу взаємодій у ньому як у дисперсній системі, проте залучають для цього незрозумілі явища гідрофобної та гідрофільної гідратації. У роботі [11] для цього ж використовують побудови щільних упаковок куль і пропонують раціональні співвідношення розмірів зерен і витрат дрібних заповнювачів. У роботах [12, 13] показано,

що фізико-механічні властивості дрібнозернистих бетонів визначені переважно електроповерхневими властивостями високодисперсних продуктів гідратації та кількістю електрогетерогенних контактів між ними [14]. Зокрема в роботі [13] встановлено, що максимальних показників міцності можна досягти в разі балансу між сумарними площами поверхонь дисперсних фаз із позитивним і негативним поверхневими зарядами та відповідними їм активними центрами поверхонь.

Мета досліджень – теоретичні та експериментальні основи отримання дрібнозернистого бетону із хвостів Полтавського ГЗК з покращеними фізико-механічними характеристиками для будівельних виробів.

Матеріали і методи досліджень. Досліджено відходи рудозбагачення (хвости) Полтавського гірничо-збагачувального комбінату. Відходи гірничо-збагачувальних комбінатів складаються з неокатаних частинок неправильної форми розміром від 0,05 до 1 мм [4]. Їхній хімічний склад і щільність залежать від мінерального складу породи, яка містить корисні копалини. У складі хвостів звичайно переважають кварц, польовий шпат, кальцит, вміст глинистих мінералів незначний. За фізичними властивостями хвости є незв'язними матеріалами з незначним внутрішнім зчепленням, не мають пластичності, не набухають, малогіроскопічні.

Мінеральний склад хвостів Полтавського ГЗК [15, 16]: кварц – 65 %, карбонати – 14 %, магнетит – 3,5 %, інші мінерали. Рівноважний електроповерхневий потенціал кварцу SiO_2 у середовищі порового електроліту цементного каменю з $pH = 12$ складає $\psi_{ep}^p = -1,26$ В, ψ_{ep}^p карбонату кальцію – кальциту $CaCO_3$ у власному середовищі з $pH = 7$ складає $+0,2$ В [14]. Для магнетиту абсолютний $\psi_{epFe_3O_4}^0$ і рівноважний $\psi_{epFe_3O_4}^0$ електроповерхневі потенціали визначимо розрахунком [14]:

$$\psi_{enFe_3O_4}^0 = -\frac{3\psi_{enFe}^0 + 4\psi_{enO}^0}{3+4} = -\frac{3 \times (-1,77) + 4 \times 1,44}{7} = -0,064 \text{ В}, \quad (1)$$

$$\psi_{enFe_3O_4}^{pH12} = \psi_{enFe_3O_4}^0 - 0,059 \text{ pH} = -0,064 - 0,059 \times 12 = -0,77 \text{ В}. \quad (2)$$

Отже, у середовищі цементного каменю не менше 68,5 % за масою зерен заповнювача (кварц, магнетит) мають негативний поверхневий заряд, не менше 14 % (карбонати) – позитивний поверхневий заряд.

Фракційний склад хвостів – залишки на ситах: 0,63 мм – 1 %; 0,35 мм – 14 %; 0,16 мм – 34 %; 0,08 мм – 25 %; прохід через сито 0,08 мм (пилувата фракція) – 26 %. На рис. 1 подано гістограму розподілу зерен за

фракціями, що відповідають інтервалам розмірів комірок суміжних сит набору, із якої видно, що визначальною є фракція 0,16–0,35 мм із середнім розміром 0,24 мм, а середньозважений розмір зерна дорівнює $0,04 \times 0,26 + 0,12 \times 0,25 + 0,24 \times 0,34 + 0,475 \times 0,14 + 0,94 \times 0,01 = 0,2$ мм.

Істинна щільність – $\rho_{п} = 2800 \text{ кг/м}^3$, насипна щільність – $\rho_{п}^н = 1700 \text{ кг/м}^3$, отже, пустотність – $\text{Пус}^п = (2800 - 1700) / 2800 = 0,41$. Питома поверхня – $\gamma = 2700 \text{ см}^2/\text{г}$.

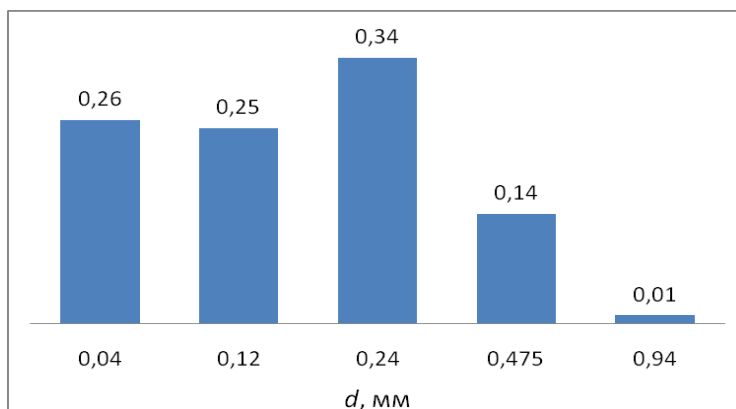


Рис. 1. Гістограма розподілу розмірів зерен хвостів Полтавського ГЗК:
 d – середній розмір фракцій

Отже, відходи ГЗК мають дисперсність природних дуже дрібних пилуватих пісків, полімінеральний склад із зернами неправильної кутастої форми, з яких не менше 68,5 % за масою мають негативний поверхневий заряд, не менше 14 % – позитивний, більш розвинену порівняно з природними пісками поверхню.

Для виготовлення зразків дрібнозернистого бетону застосовано шлакопортландцемент ПЦ Ш/А-400. Для виготовлення контрольних зразків для

порівняння замість хвостів ГЗК застосовували пісок природний кварцовий Безлюдівського родовища з модулем крупності 1,1.

Як мінеральну добавку використовували мікрокремнезем із вмістом SiO_2 93–95 %, питоною поверхнею $8500 \text{ см}^2/\text{г}$.

Фізико-механічні властивості дрібнозернистого бетону визначали на зразках-балочках $160 \times 40 \times 40$ мм з відношенням дрібний заповнювач: цемент = 3:1, В/Ц = 0,5. Зразки виготовляли з рівнорухомих сумішей

з осадкою конуса 1 см. Без добавок зазначена рухомість досягнута на природному піску за В/Ц = 0,5, на хвостах ГЗК – за В/Ц = 0,95. Для забезпечення рухомості 1 см суміші на хвостах ГЗК за В/Ц = 0,5 застосовано такі добавки-суперпластифікатори: полікарбоксилати Sika ViscoCrete 2508, Sika ViscoCrete 20NE, Релаксол-Супер ПК, сульфонафталінформальдегід С-3. Зразки ущільнювали пошаровим пресуванням товщиною шарів 5 мм тиском 12 МПа, піддавали природному твердінню і випробували стандартними методами у віці 3, 7 і 28 діб із визначенням границі міцності на розтяг при згині f_{ct} і міцності на стиск f_c .

Теоретичне обґрунтування отримання дрібнозернистого бетону із

хвостів ГЗК. У роботі [14] для важкого бетону найвищих показники міцності, водонепроникності та мінімальних деформативності досягають шляхом формування щільних пакувань прошарків зерен дрібного заповнювача – між зернами крупного заповнювача, цементу – між зернами дрібного заповнювача, продуктів гідратації цементу – між частинками цементу (клинкерними реліктами). Інструментарієм для цього запропоновано визначення і забезпечення оптимальних значень коефіцієнтів розсунення зерен заповнювачів. Для дрібнозернистого бетону із хвостів ГЗК оптимальний коефіцієнт розсунення заповнювача μ_{opt} і його витрати на 1 м³ бетону дорівнюватимуть

$$\mu_{opt} = 2,1 \times (1 + d_{ц}/d_3)^3 - 1,1 = 2,1 \times (1 + 0,03/0,24)^3 - 1,1 = 1,89, \quad (3)$$

$$Z = \frac{1}{\frac{\mu_{opt} \rho_{ц}}{\rho_3} + \frac{1}{\rho_3}} = \frac{1}{\frac{1,89 \times 0,41}{1700} + \frac{1}{2800}} = 1230 \text{ кг}, \quad (4)$$

де $d_{ц}$ і d_3 – середній розмір визначальних фракцій цементу і заповнювача відповідно 0,03 і 0,24 мм.

Якщо враховувати, що пилувата фракція заповнювача в кількості 24 % відповідає за розмірами частинкам цементу і разом з

ними бере участь у формуванні прошарків між зернами визначальної фракції заповнювача, загальні витрати заповнювача мають складати $Z = 1230/0,76 = 1618 \text{ кг/м}^3$.

Якщо прийняти В/Ц = 0,5, витрати цементу Ц та води В складатимуть

$$Ц = \frac{1 - \frac{Z}{\rho_3}}{\frac{1}{\rho_ц} + \frac{В/Ц}{\rho_в}} = \frac{1 - \frac{1618}{2800}}{\frac{1}{3100} + \frac{0,5}{1000}} = 513 \text{ кг/м}^3, \quad (5)$$

$$В = Ц \times В/Ц = 513 \times 0,5 = 257 \text{ кг/м}^3. \quad (6)$$

Принцип абсолютних об'ємів забезпечено так:

$$Z/\rho_3 + Ц/\rho_ц + В/\rho_в = 1618/2800 + 513/3100 + 257/1000 = 1 \text{ м}^3. \quad (7)$$

Оптимальний склад бетону в масовому співвідношенні дорівнюватиме

$$3 : \text{Ц} : \text{В} = 1618/513 : 1 : 0,5 = 3,15 : 1 : 0,5. \quad (8)$$

Бетон під навантаженням руйнується від розтягувальних напружень, які виникають від поперечної деформації в стиснутих виробках і зонах конструкцій, що згинаються, розтягнутих зонах конструкцій, що згинаються, розтягнутих елементах [14]. Від розтягувальних напружень бетон руйнується також через поперемінне заморожування – танення, сольову корозію. Багато дослідників висували і доводили припущення, що дрібнозернисті бетони за порівняною міцністю на стиск характеризуються більшою міцністю на розтяг, ніж бетони з крупним заповнювачем [11]. Висували і доводили також припущення, що міцність бетону більшою мірою визначена прошарками цементного каменю в місцях максимального наближення зерен заповнювачів одне до одного, оскільки цементний камінь і структура продуктів гідратації в міжзернових порожнинах між ними менш щільні [11, 14].

Виходячи з другого припущення міцність дрібнозернистого бетону, Па, на розтяг f_{ct} можна подати за аналогією з рівнянням міцності дисперсних систем Ребіндера–Щукіна [14] як

$$f_{ct} = nF_t, \quad (9)$$

де n – кількість одиничних контактів в одиниці площі поперечного перерізу розтягнутого виробу або зони, $1/\text{м}^2$;

F_t – сила, необхідна на розрив одиничного контакту між зернами дрібного заповнювача, Н (рис. 2, а),

$$F_t = f_{cpt}S, \quad (10)$$

де f_{cpt} – міцність на розтяг цементного каменю в контактних зонах між зернами дрібного заповнювача, Па;

S – площа контактної зони в одиничному контакті.

Враховуючи кутасту форму зерен хвостів ГЗК, припустимо, що між ними переважають контакти між кутом і плоскою ділянкою поверхні (рис. 2, б). У цьому випадку S мало залежить від розміру зерен.

Підставляючи вираз (10) у вираз (9) отримаємо, Па,

$$f_{ct} = f_{cpt}nS. \quad (11)$$

З виразу (11) видно, що підвищення f_{ct} можна досягнути за рахунок збільшення величини будь-якого з трьох множників, а саме міцності цементного каменю f_{cpt} (зниженням В/Ц тощо), кількості одиничних контактів в одиниці площі поперечного перерізу n , а також площі одиничного контакту S . Отже, у випадку однакового цементного каменю, тобто однакового f_{cpt} , дрібнозернистий бетон із меншими зернами заповнювача забезпечить більшу кількість контактів $n_2 > n_1$ (рис. 2, в, г) і відповідно більшу міцність $f_{ct2} > f_{ct1}$ (рис. 2, д, е).

Як було зазначено, S мало залежить від розміру зерен заповнювача кутастої форми. Проте в контактах, схема яких наведена на рис. 2, б, їхня площа S буде збільшуватись у разі вбудовування в них дрібних частинок пилюватих фракцій і/або частинок штучно уведених мінеральних наповнювачів і мікронаповнювачів (рис. 3, а). Структуру дрібнозернистого бетону як щільну упаковку зерен заповнювача у вигляді куль із плівками продуктів гідратації на їхній поверхні з оптимальним вмістом його пилюватих фракцій, мінеральних наповнювачів і мікронаповнювачів (рис. 3, б) О. Г. Вандаловський умовно назвав ідеальною, а сам бетон – особливо дрібнозернистим ОДБ [11].

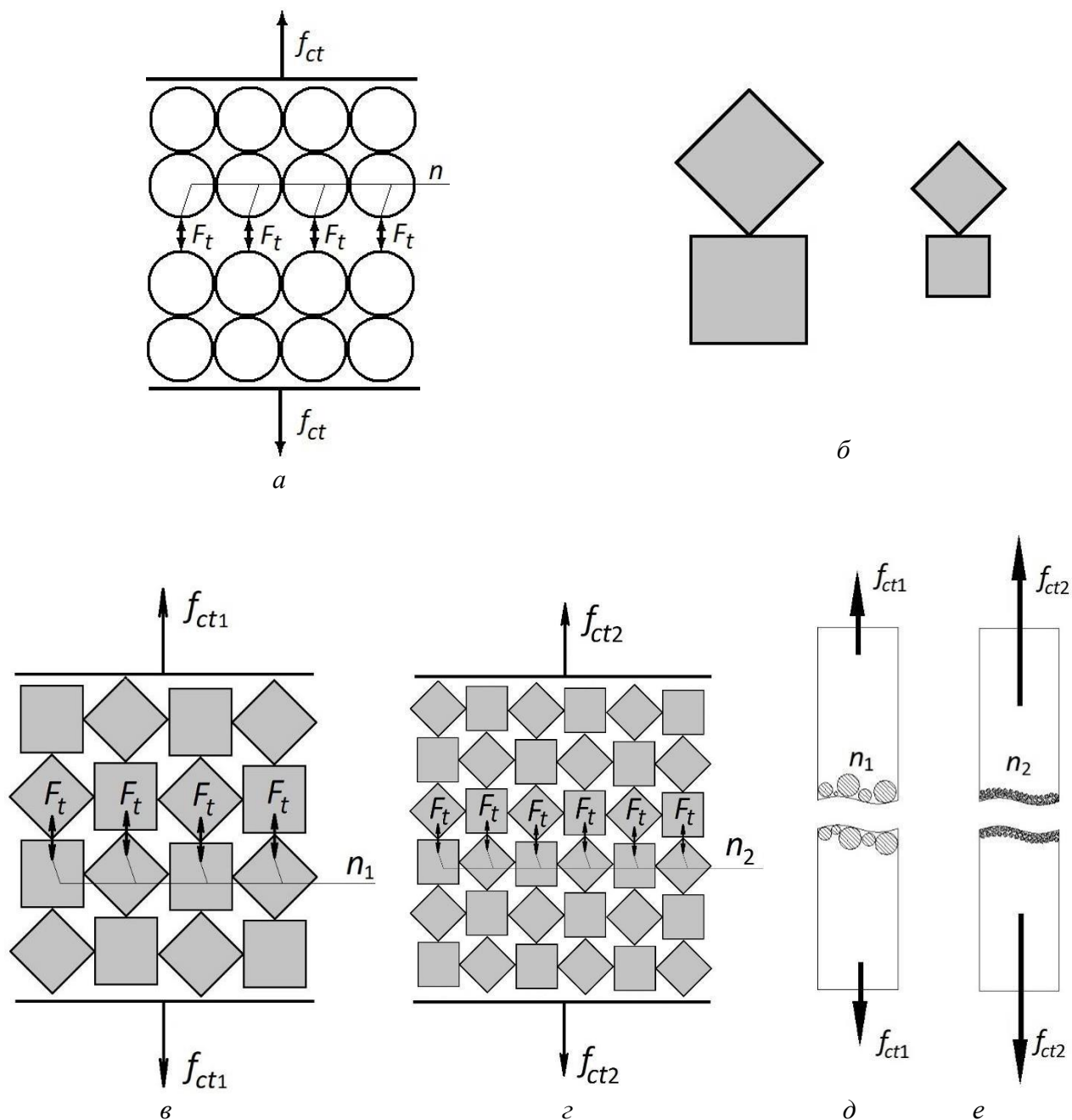


Рис. 2. Схеми контактів:

a – між частинками дисперсної фази в дисперсній системі; *б* – між окремими частинками кутастої форми різного розміру; *в*, *г* – між зернами заповнювача кутастої форми в структурі дрібнозернистого бетону з більшими (*в*) і меншими (*г*) зернами; *д*, *е* – між поверхнями розриву дрібнозернистого бетону з більшими (*д*) і меншими (*е*) зернами

Розрахуємо оптимальне співвідношення розмірів фракцій, які забезпечать ідеальну структуру ОДБ із хвостів

Полтавського ГЗК, користуючись схемою рис. 3, б.

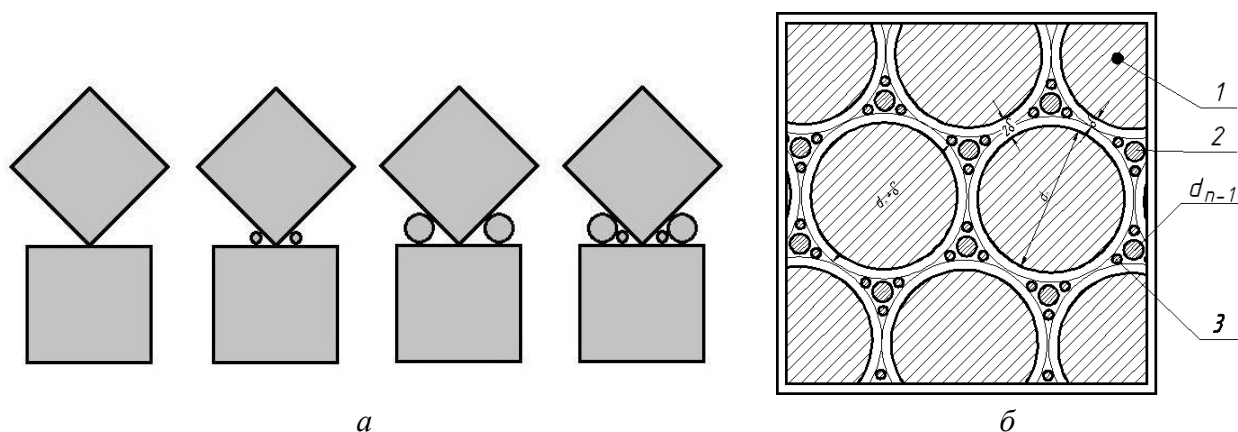


Рис. 3. Структура особливо дрібнозернистого бетону:

a – схема збільшення площі контакту між зернами кутастої форми за допомогою пилюватих фракцій, мінеральних наповнювачів і мікронаповнювачів; *б* – схема ідеальної структури ОДБ; 1 – зерна заповнювача; 2 – частинки цементу (клінкерних реліктів), пилюватих фракцій заповнювача, мінерального наповнювача; 3 – частинки мінерального мікронаповнювача

За Й. М. Ахвердовим [17], у міжзернових порожнинах упаковки сферичних зерен діаметром d_n , показаної на рис. 3, *б*, містяться частинки діаметром

$$d_{n-1} = 0,156d_n. \quad (12)$$

З урахуванням плівок продуктів гідратації на зернах заповнювача товщиною δ (12) набуде вигляду

$$d_{n-1} + \delta = 0,156(d_n + \delta). \quad (13)$$

Із виразу (13) отримаємо вираз для визначення потрібного розміру частинок пилюватих фракцій заповнювача і/або частинок мінерального наповнювача, мм,

$$d_{n-1} = 0,156d_n + 0,844\delta. \quad (14)$$

Товщина плівки продуктів гідратації δ , за роботою [17], залежить від розміру зерен заповнювача: за $d = 1$ мм $\delta = 47$ мкм = $0,0047$ мм, $d = 0,1$ мм – $\delta = 4,7$ мкм, $d = 0,01$ мм – $\delta = 0,47$ мкм. Ця залежність із коефіцієнтом кореляції 1 апроксимується лінійним рівнянням, мм,

$$\delta = 0,047d. \quad (15)$$

Підставляючи вираз (15) у вираз (14), отримаємо, мм,

$$d_{n-1} = 0,156d_n + 0,844 \times 0,047d_n = 0,2d_n. \quad (16)$$

Аналогічний вигляд матиме вираз для визначення потрібного розміру частинок мікронаповнювача:

$$d_{n-2} = 0,2d_{n-1}. \quad (17)$$

Отже, для середньозваженого розміру зерен хвостів ГЗК $d_n = 0,2$ мм потрібні для формування ідеальної структури ОДБ розміри частинок пилюватих фракцій і/або наповнювача і мікронаповнювача, за формулами (16) і (17) відповідно, складуть, мкм,

$$d_{n-1} = 0,196 \times 0,2 = 0,04 \text{ мм} = 40,$$

$$d_{n-2} = 0,196 \times 0,04 = 0,008 \text{ мм} = 8.$$

Із розрахунків видно, що для утворення максимальної площі контактів у структурі ОДБ розмір кожної меншої фракції має бути у п'ять разів менший за розмір попередньої більшої фракції.

Експериментальні дослідження з розроблення дрібнозернистого бетону із

хвостів ГЗК для будівельних виробів.

Виконано експериментальні дослідження зі створення виробів із дрібнозернистого бетону із хвостів ГЗК із покращеними фізико-механічними властивостями. За однакових В/Ц = 0,5 міцність на розтяг ОДБ на хвостах ГЗК виявилася в 1,5 раза вищою за міцність на розтяг дрібнозернистого бетону на природному піску.

Досліджено залежність міцності ОДБ на хвостах ГЗК з В/Ц = 0,5 від вмісту добавок-суперпластифікаторів: полікарбоксилатів Sica ViscoCrete 2508, Sika ViscoCrete 20HE, Релаксол-Супер ПК,

сульфонафталінформальдегіду С-3. Результати дослідження наведено на рис. 4, з якого видно, що з підвищенням вмісту добавок міцність ОДБ збільшується. Усі залежності мають перелами, після яких подальше зростання міцності стає несуттєвим. Це можна спостерігати за вмістом добавки: Sica ViscoCrete 2508 – 2 %, Sika ViscoCrete 20HE – 1,5 %, Релаксол-Супер ПК – 2 %, С-3 – 1 %. Максимальна міцність ОДБ може бути досягнена за застосування добавки 1,5 % SikaViscoCrete 20HE – 35 МПа і 1 % С-3 – 33,5 МПа.

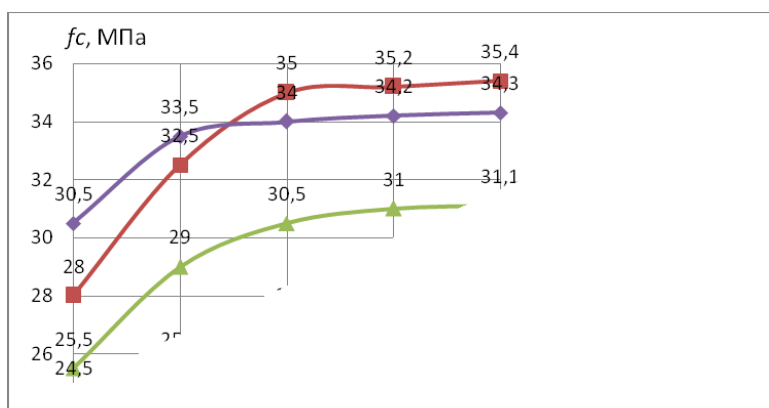


Рис. 4. Залежність міцності на стиск f_c ОДБ на хвостах Полтавського ГЗК від вмісту добавок-суперпластифікаторів СП/Ц

Досліджено залежність міцності на стиск f_c і розтяг f_{ct} і співвідношення між ними f_{ct}/f_c ОДБ на хвостах Полтавського ГЗК від його складу – масового відношення витрат заповнювача та цементу 3:Ц. Результати дослідження наведено на рис. 5, із якого видно, що зі збільшенням вмісту заповнювача від 3:Ц = 1:1 до 3:1 міцність на стиск f_c і розтяг f_{ct} і співвідношення між ними f_{ct}/f_c майже не змінюється, після чого з подальшим збільшенням 3:Ц міцність f_c і f_{ct} різко знижується, проте відношення f_{ct}/f_c зростає. Це відповідає отриманому

теоретичним розрахунком оптимальному складу бетону 3:Ц = 3,15:1 і підтверджує застосовність методики розрахунку [14] для ОДБ на хвостах ГЗК.

Із рис. 5 видно також, що за однакових 3:Ц = 3:1 і В/Ц = 0,5 міцність ОДБ на хвостах ГЗК виявилася вищою за міцність дрібнозернистого бетону на природному піску: на стиск f_c – у $27/13,1 = 2$ рази, на розтяг f_{ct} – у $9,7/5,1 = 1,9$ рази. Відношення f_{ct}/f_c у ОДБ на хвостах ГЗК виявилось нижчим і склало 0,92 такого для дрібнозернистого бетону на природному піску.

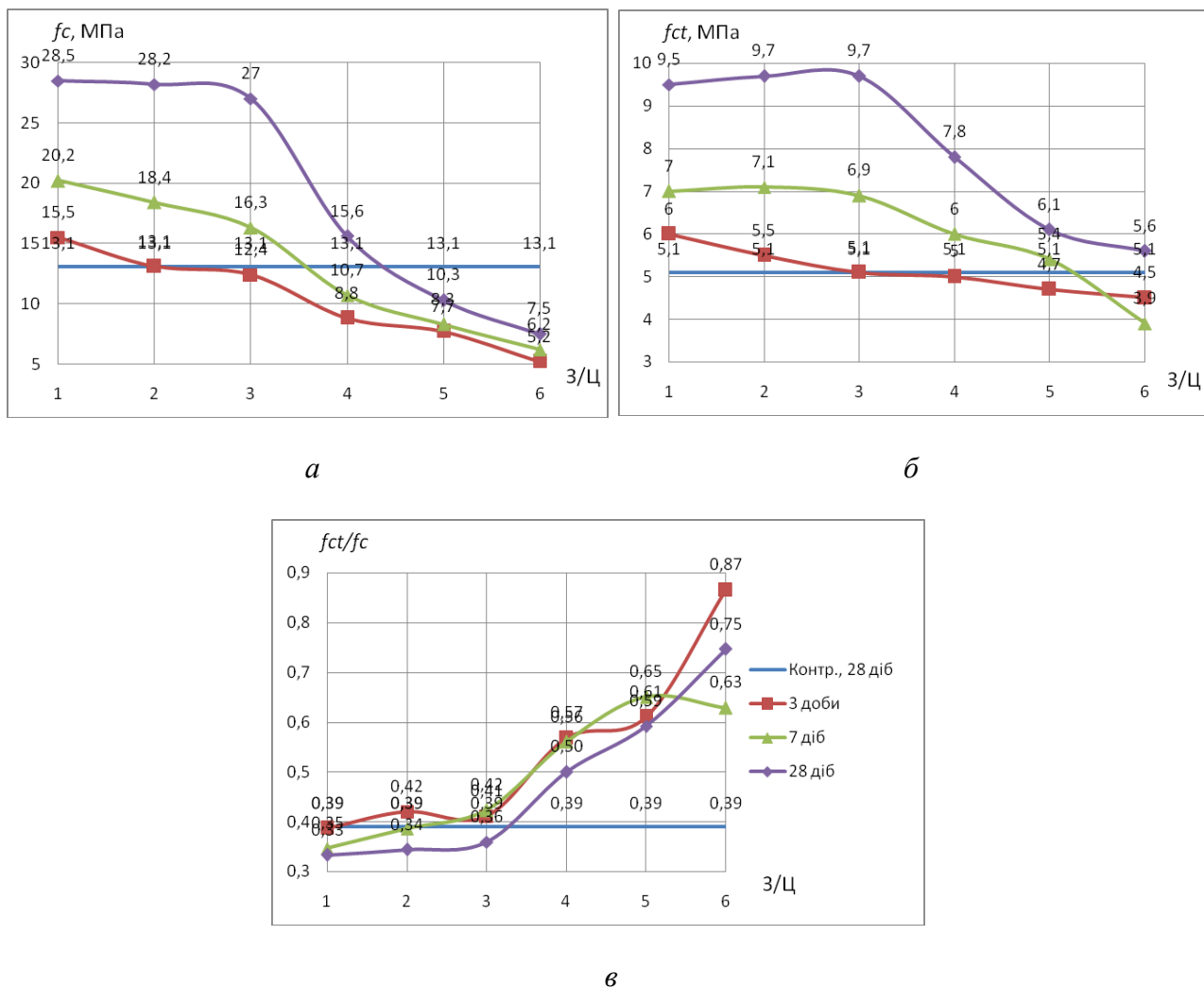


Рис. 5. Залежність міцності на стиск f_c (а) і розтяг f_{ct} (б) і відношення f_{ct}/f_c (в) ОДБ із хвостів Полтавського ГЗК у віці 3, 7 і 28 діб і дрібнозернистого бетону на природному піску (контрольних зразків) у віці 28 діб від відносного вмісту заповнювача З/Ц

Досліджено залежність міцності на стиск f_c і розтяг f_{ct} і співвідношення між ними f_{ct}/f_c ОДБ на хвостах Полтавського ГЗК від масового відношення вмісту мікрокремнезему до вмісту цементу МК:Ц. Результати дослідження наведено на рис. 6, із якого видно, що зі збільшенням вмісту кремнезему до 15 % міцність збільшується: стиск – на 44 % від 27 до 39 МПа, розтяг – на 20 % від 9,7 до 11,6 МПа. Подальше збільшення вмісту мікрокремнезему зростання міцності майже не забезпечує.

Відношення f_{ct}/f_c зі збільшенням вмісту мікрокремнезему знижується.

Досліджено залежність міцності на стиск f_c і розтяг f_{ct} і співвідношення між ними f_{ct}/f_c ОДБ на хвостах Полтавського ГЗК від тиску пресування Р. Результати дослідження наведено на рис. 7, із якого видно, що зі збільшення тиску з 2 до 12 МПа як міцність на стиск f_c і розтяг f_{ct} , так і співвідношення між ним f_{ct}/f_c збільшуються. Подальше підвищення тиску пресування майже не підвищує ці показники.

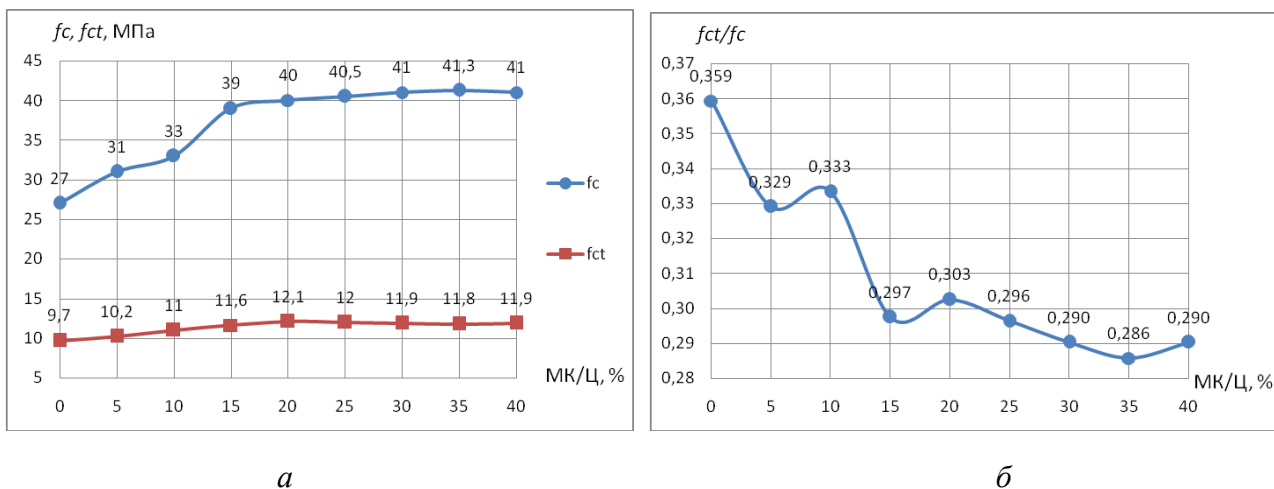


Рис. 6. Залежність міцності на стиск f_c і розтяг f_{ct} (а) і відношення f_{ct}/f_c (б) ОДБ на хвостах Полтавського ГЗК від вмісту мікрокремнезему МК/Ц у віці 28 діб

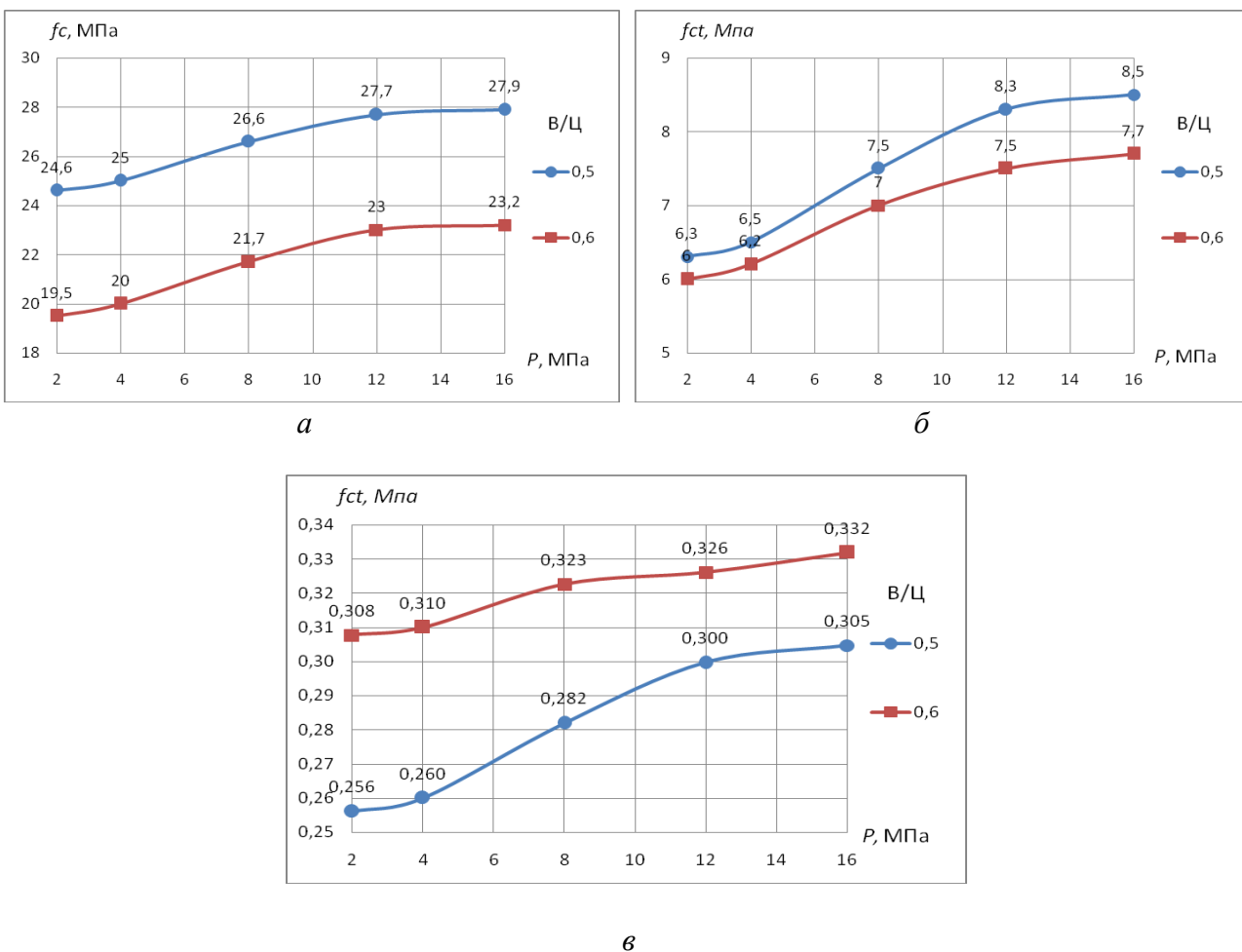


Рис. 7. Залежність міцності на стиск f_c (а) і розтяг f_{ct} (б) і відношення f_{ct}/f_c (в) ОДБ на хвостах Полтавського ГЗК у віці 28 діб від тиску пресування P

Висновки та рекомендації

Виконано теоретичне обґрунтування отримання особливо дрібнозернистого бетону (ОДБ) із хвостів Полтавського ГЗК як дрібнозернистого заповнювача. Обґрунтовано його структуру з урахуванням контактів між зернами заповнювача кутастої форми, доведено можливість підвищення міцності уведенням мінеральних наповнювачів і мікронаповнювачів із частинками розміром, меншим у п'ять разів, ніж зерна заповнювача та частинки цементу відповідно. Обґрунтовано визначення складу ОДБ із хвостів Полтавського ГЗК шляхом визначення і забезпечення оптимальної величини коефіцієнта розсунення зерен заповнювача цементним тістом $\mu_{opt} = 1,89$ з включенням до нього пилюватих фракцій заповнювача.

Визначено та експериментально підтверджено оптимальний склад ОДБ заповнювач: цемент : вода = (3–3,15):1:0,5 з обов'язковим застосуванням добавки супер-

пластифікатора для забезпечення В/Ц = 0,5. Експериментально встановлено, що максимальної міцності ОДБ можна досягти за застосування суперпластифікаторів: полікарбоксилату 1,5 % або сульфонафтальніформальдегіду 1 % від маси цементу.

Встановлено, що за однакових З:Ц = 3:1 і В/Ц = 0,5 міцність ОДБ на хвостах ГЗК перевищує міцність дрібнозернистого бетону на природному особливо дрібнозернистому піску: на стиск – у 2 рази, на розтяг – 1,9 рази і досягає у віці 28 днів 35 МПа. Уведення мікрокремнезему в кількості до 15 % маси цементу дає змогу ще підвищити міцність на стиск на 44 %, на розтяг – 20 %. Зазначено, що зі збільшенням міцності ОДБ будь-якими заходами співвідношення між міцністю на розтяг і стиск f_{ct}/f_c знижується.

Вироби з ОДБ запропоновано формувати пошаровим пресуванням товщиною шару 5 мм. Експериментально встановлено, що максимальної міцності можна досягти за тиску пресування 12 МПа.

Список використаних джерел

1. Peter Betz, Verena Curoşu, Stefan Loehnert, Steffen Marx, Manfred Curbach. Classification of Multiaxial Behaviour of Fine-Grained Concrete for the Calibration of a Microplane Plasticity Model. *Buildings*. 13(11). (2023). 2704. DOI: 10.3390/buildings13112704.
2. Alein Js, Bhuvaneshwari Muthusubramanian. Influence of Basalt Fiber and Slag on the Moduli of Elasticity of Fine-Grained Concrete. In book: Sustainable Innovations in Construction Management (2023). DOI: 10.1007/978-981-99-6233-4_43.
3. Vorokhaiev Anatolii, Barabash Ivan, Ksionshkevich Lyubov, Zeljko Kos, Grynyova I. I. Fine-grained Fiber Concrete on Mechanoactivated Portlandcement. *Croatian Regional Development Journal*. 2(1). (2021). 41-49. DOI: 10.2478/crdj-2021-0007.
4. Федоров И. С., Добровинская О. Х. Свойства и расчетные характеристики рекультивируемых хвостов обогатительных фабрик. Москва: Недра, 1970. 152 с.
5. Shishkina Aleksandra, Piskun Illia. Formation of the strength of fine-grained concrete based on modified slag Portland cement. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 5 (6(125)). (2023.) 74-81. DOI: 10.15587/1729-4061.2023.289929.
6. Shishkina Alexandra, Domnichev Andriy. Ensuring uniformity of strength of fine-grained concrete based on modified composite cement. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 1(6 (127)). (2024). 47-53. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.296898.
7. Nguyen S., Thia Q., Ho L. Properties of fine-grained concrete containing fly ash and bottom ash. *Magazine of Civil Engineering*. 107(7) (2021). 10711. DOI: 10.34910/MCE.107.11.
8. Ravi Sagar Poudel. Fine-Grained Concrete on Modified Binder. *Promyshlennoe i Grazhdanskoe Stroitelstvo*. 3. (2022). 31-36. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.03.31-36.

9. Matýsková Kateřina, Bílek Vlastimil, Procházka Lukáš, Hédlová Radka, Hornáková Marie. Replacement of Fine Aggregates in Fine-Grained Concrete by Waste Material from Cetrus Boards Production. *Defect and Diffusion Forum*. 432:31-38. (2024). DOI: 10.4028/p-sMCI67.
10. Nurbayeva M., Aruova L., Kalym S., Toleubayeva Sh., Urkinbayeva Zh., Aukazhieva Zh., Ospanova Zh., Budikova A., Zhakanov A. Influence of Fiber on the Strength Characteristics of Fine-Grained Concrete. In book: *Proceedings of 2021 4th International Conference on Civil Engineering and Architecture*. (2022). DOI: 10.1007/978-981-16-6932-3_13.
11. Вандаловський А. Г., Казімагомедов І. Е., Чайка В. М. Оптимізація структури мікробетону. *Науковий вісник будівництва*. 65. (2011). 153–160.
12. Бабушкин В. И., Плугин А. А., Костюк Т. А. Особенности подбора состава формовочной смеси для цементно-песчаных стеновых материалов заданной плотности. *Науковий вісник будівництва*. 4. (1998). 61-63.
13. Бабушкин В. И., Плугин А. А., Костюк Т. А., Матвиенко В. А. Влияние активных поверхностных центров на прочность свежесформованных мелкозернистых бетонов. *Науковий вісник будівництва*. 5. (1999). 85-88.
14. Основы теории твердения, прочности, разрушения и долговечности портландцемента, бетона и конструкций из них. Т. 3. Теория прочности, разрушения и долговечности бетона, железобетона и конструкций из них / А. Н. Плугин, А. А. Плугин, О. А. Калинин и др.; под ред. А. Н. Плугина. Київ: Наукова думка, 2012. 288 с.
15. Вандаловський А. Г., Чайка В. М. Особливості технології бетонів на дрібнозернистих відходах. *Науковий вісник будівництва*. 63. (2011). 215–219.
16. Вандаловський О. Г., Казімагомедов І. Е., Чайка В. М. Міцнісні властивості бетону на відходах гірничозбагачувальних комбінатів як заповнювача. *Науковий вісник будівництва*. 64. (2011). 98–101.
17. Ахвердов И. Н. Основы физики бетона. Москва: Стройиздат, 1981. 463 с.

Плу́гин Андрій Аркадійович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-6941-2076. Тел.: +38 (057) 730-10-58. E-mail: plugin_aa@kart.edu.ua.

Чайка Віталій Миколайович, інженер-конструктор, ТОВ «АрХаус». ORCID iD: 0009-0006-9949-4371. Тел.: +38 (097) 527-79-42. E-mail: chayki.vn@gmail.com.

Мусієнко Сергій Миколайович, аспірант, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0002-5418-6886. Тел.: +38 (095) 060-70-06. E-mail: serb_86@ukr.net.

Наджафов Ельшад Фаїд огли, аспірант, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-6143-8183. E-mail: nadjafov@kart.edu.ua.

Plugin Andrii, Dr. Sc. (Tech.), professor, head of department of Railway Track and Transport Structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-6941-2076. Tel.: +38 (057) 730-10-58.

E-mail: plugin_aa@kart.edu.ua.

Chaika V.M., design engineer TOB «АрХаус». ORCID iD: 0009-0006-9949-4371. Tel.: +38 (097) 527-79-42.

E-mail: chayki.vn@gmail.com.

Musienko S.M., postgraduate student, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0002-5418-6886. Tel.: +38 (095) 060-70-06. E-mail: serb_86@ukr.net.

Najafov El'shad Faih Ohly, postgraduate student, Ukrainian State University of Railway Transport.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-6143-8183>. E-mail: nadjafov@kart.edu.ua.

Статтю прийнято 14.06.2024 р.