

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

В. Р. Сердюк, О. В. Христич, М. С. Лемешев

БЕТОНИ З ПІДВИЩЕНИМИ РАДІАЦІЙНО-ЗАХИСНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2020

Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/584>

Видавництво Вінницького національного технічного університету

<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog>

УДК 621.373.5

C72

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 7 від 27.02.2020 р.)

Рецензенти:

С. О. Кровяков, доктор технічних наук, доцент

М. Ф. Друкований, доктор технічних наук, професор

Сердюк, В. Р.

C72 Бетони з підвищеними радіаційно-захисними властивостями : монографія [Електронний ресурс] / В. Р. Сердюк, О. В. Христич, М. С. Лемешев. –Вінниця : ВНТУ, 2020. – 82 с.

ISBN 978-966-641-794-0

В монографії обґрунтовано і експериментально підтверджено можливість набування металонасиченим бетоном підвищених радіаційно-захисних властивостей порівняно із традиційними спеціальними матеріалами. Представлено технологічні основи створення спеціального бетону з регульованими фізико-механічними і радіаційно-захисними властивостями. Запропоновано рецептурно-технологічні параметри радіаційно-захисних бетонів для виготовлення бар'єрного біологічного захисту.

УДК 621.373.5

ISBN 978-966-641-794-0

© В. Сердюк, О. Христич, М. Лемешев, 2020

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1 РАДІОАКТИВНІ ВИПРОМІНЮВАННЯ І БУДІВЕЛЬНІ МАТЕРІАЛИ ЕКРАНІВ БІОЛОГІЧНОГО ЗАХИСТУ	7
1.1 Фізична природа іонізуючих випромінювань та їх взаємодія з поглинаючою речовиною	7
1.2 Біологічна дія іонізуючих випромінювань	9
1.3 Цементні бетони, як радіаційнозахисні матеріали	11
2.1 Сировинні матеріали	17
2.2 Оцінка рівня сумарної активності природних радіонуклідів, сировинних матеріалів.....	24
2.3 Методика досліджень.....	25
2.4 Пристрої та обладнання	31
3 МАКРОСТРУКТУРНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕТОНУ 3 РАДІАЦІЙНО-ЗАХИСНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ.....	34
3.1 Вплив технологічних параметрів на властивості бетону-м	34
3.2 Дослідження фазових новоутворень і мікроструктури бетону з мілкодисперсним металевим наповнювачем	42
4 ДОСЛІДЖЕННЯ РАДІАЦІЙНО-ЗАХИСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗРАЗКІВ БЕТОНУ-М.....	53
4.1 Теоретичні передумови зниження проникаючої здатності радіоактивного випромінювання екраном з бетону-м	53
4.2 Кількісні і якісні характеристики процесів послаблення іонізуючих випромінювань.....	56
4.3 Технологія виготовлення радіаційнозахисного оздоблювального покриття огорожуючих конструкцій всередині приміщень будівель і споруд.....	65
ВИСНОВКИ.....	69
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	71

ВСТУП

В сучасних умовах дефіциту традиційних видобувних джерел енергії найбільш перспективними є використання енергії атома. Наряду з розвитком ресурсозберігаючих технологій, продовження експлуатації ядерних установок дозволяє значно зменшити обсяги шкідливих викидів порівняно з наслідками від експлуатації теплових електричних станцій, які використовують вугілля і природний газ.

Разом з тим, наслідками розвитку науково-технічного прогресу, широкомасштабного використання природних і штучних джерел іонізуючих випромінювань в медицині, науці, промисловості, енергетиці, сільському господарстві, оборонній та інших галузях народного господарства, постала загроза підвищення рівня шкідливих дозових навантажень на навколишнє середовище. Такі зміни техногенних навантажень для навколишнього середовища потребують запровадження невідкладних заходів з біологічного захисту від шкідливих впливів іонізуючих і побічно-іонізуючих випромінювань.

Системи інженерно-технічних рішень зі створення належних санітарно-гігієнічних умов при експлуатації ядерних енергетичних установок передбачає улаштування бар'єрного захисту у вигляді радіаційно-поглинаючих покриттів і спеціальних екранів. Метою радіаційного захисту є попередження соматичних і зведення до мінімуму соматико-стохастичних генетичних наслідків, зумовлених шкідливим впливом зовнішнього і внутрішнього радіаційного опромінення, як окремих працівників, так і населення в цілому, під час використання, зберігання і транспортування радіоактивних речовин, експлуатації ядерних реакторів, рентгенівських апаратів та інших джерел радіації.

Світовий досвід показує, що під час спорудження об'єктів ядерної енергетики, сховищ для зберігання радіоактивної сировини та захоронення радіоактивних відходів, будівництва об'єктів цивільної оборони, найбільш поширеного застосування в будівельній практиці набули бетони.

Можливість експлуатації їх як будівельних композиційних матеріалів біологічного захисту забезпечується завдяки доступності технології регулювання компонентного складу сировинної суміші, яка дозволяє використовувати основними компонентами традиційні в'язучі

системи. Регулювання радіаційно-захисних властивостей здійснюється за рахунок використання спеціальних заповнювачів, здатних вступати в фізико-хімічні взаємодії з в'язучим у складі формувальних спеціалізованих будівельних сумішей. Використання в складі бетону хімічних елементів з різними порядковими номерами дає змогу оптимізувати і взаємопов'язувати між собою механічні, фізичні і спеціальні захисні властивості від іонізуючого випромінювання.

Найбільш вираженими радіаційно-захисними властивостями від фотонних (найбільша проникаюча здатність порівняно з іншими видами випромінювань) електромагнітних іонізуючих випромінювань характеризуються метали. Внесення змін в рецептурно-технологічні параметри традиційних бетонних сумішей шляхом модифікування їх електрофізичних властивостей при додаванні металевого заповнювача дозволяє отримати композиційний матеріал з підвищеними радіаційно-захисними властивостями. З точки зору фізико-хімічних взаємодій і структуроутворення багатокомпонентних систем на основі мінеральних в'язучих, металонасичений композиційний матеріал може бути представлений, як складна багат шарова гетерогенна система, властивості кожного елемента якої різняться між собою (деяка аналогія багат шарових радіаційно-захисних екранів).

Використання в якості важкого заповнювача бетону дрібнодисперсного металевого порошку (відходи металообробних виробництв) забезпечило отримання нового різновиду струмопровідних бетонів – бетел-м (бетон електропровідний металонасичений). В фізичному розумінні бетел-м являє собою гетерогенну систему, властивості кожного елемента якої різняться між собою. Так наприклад один є діелектричною зв'язкою, а інший – електропровідною складовою матеріалу. Внаслідок рівномірного розподілу частинок металу в цементі матриці створюється структура цементного каменю, яка є аналогію цементним бетонам з мінеральними дисперсними домішками. Наявність хорошої адгезії між частинками важкого електропровідного заповнювача і в'язучими компонентами суміші, суміщення лінійних деформацій цементного каменю і металу, широкий діапазон електричного опору стали результатом отримання композиційного матеріалу з широким

діапазоном теплофізичних, конструктивних і фізико-механічних властивостей, з підвищеними температуропровідністю і тепловіддачею.

Штучний синтез щільної структури дисперснонаповненого конгломерату з великою площею внутрішніх поверхонь розділу фаз також позитивно відобразився на послабленні проникаючих потоків іонізуючих випромінювань в структурі екрануючого матеріалу. Оскільки в структурі бетелу-м створена об'ємна електропровідна матриця, а фотонним електромагнітним випромінюванням згідно з законами квантової фізики одночасно притаманні хвильові та корпускулярні властивості, то поглинання радіоактивності в структурі матеріалу відбуватиметься збудженням в об'ємі електропровідної матриці полем протидії або за рахунок багаторазових відбивань і розсіювань потоку випромінювань поверхнею металу. Насиченість цементного в'язучого металевим порошком і утворення при цьому залізовмісних гідросилікатів з підвищеним вмістом хімічно зв'язаної води очевидно може наближувати бетел-м за спеціальними властивостями до багатошарових метало-водяних екранів (послаблення змішаного n і γ -випромінювання).

1 РАДІОАКТИВНІ ВИПРОМІНЮВАННЯ І БУДІВЕЛЬНІ МАТЕРІАЛИ ЕКРАНІВ БІОЛОГІЧНОГО ЗАХИСТУ

1.1 Фізична природа іонізуючих випромінювань та їх взаємодія з поглинаючою речовиною

Проблема забезпечення радіаційної безпеки персоналу, населення і навколишнього середовища, є однією з найважливіших задач, від вирішення яких залежать масштаби практичного використання ядерної енергії в народному господарстві. В загальному комплексі технічних рішень захисту від іонізуючих випромінювань важлива роль відводиться спеціальним матеріалам і конструкціям, здатним послаблювати радіацію.

Найбільш загальними властивостями іонізуючого випромінювання є здатність проникати через матеріали різної товщини і реалізувати свою біологічну дію через ефекти іонізації, які можуть призвести до захворювання і загибелі клітин організму.

За своєю фізичною природою радіоактивне випромінювання як безпосередньо-, так і побічно-іонізуюче, об'єднує декілька видів. Серед них розрізняють: корпускулярне (випромінювання різного роду ядерних частинок α , β , n , p) і електромагнітне (рентгенівське і γ -випромінювання, що виникає під час ядерних перетворень) [1–14].

Під час проникнення іонізуючого випромінювання через поглинаючу речовину, воно взаємодіє з атомами і молекулами середовища. Результатами взаємодії може бути збудження атомів і виривання електронів з електронних оболонок нейтрального атома. Останній перетворюється в позитивно заряджений іон і відбувається первинна іонізація. Вибиті електрони в свою чергу витрачають свою енергію на вторинну іонізацію при взаємодії з зустрічними атомами. В результаті таких багатократних взаємодій електрон втрачає свою енергію і приєднується до нейтрального атома, створюючи негативно заряджений іон. Таким чином, енергія радіації під час взаємодії з речовиною витрачається в основному на іонізацію середовища.

В залежності від величини поглинутої енергії іонізуючого випромінювання біологічним об'єктом, ступені променевого ураження мо-

жуть бути різними. Тому в якості кількісної міри дії випромінювання беруть середню енергію, яка поглинається одиницею маси речовини. Така фізична характеристика називається поглинутою дозою [13].

$$D = \frac{\Delta E}{\Delta M} \quad (1.1)$$

де ΔE – середня енергія, яка поглинута в елементарному об'ємі речовини ΔM .

Внаслідок опромінення живих організмів, в них виникають різні біологічні ефекти. Різниця між ними при однаковому значенні величини поглинутої дози пояснюється різними видами іонізуючих випромінювань. У зв'язку з цим вводиться кількісна міра біологічної дії випромінювання, яка називається еквівалентною дозою. Біологічні ефекти, викликані будь-яким видом радіоактивних випромінювань прийнято порівнювати з ефектами іонізації зумовленими рентгенівським і γ -випромінюванням [1–5,].

Значення еквівалентної дози для довільних видів іонізуючих випромінювань визначається за формулою (1.2) [1].

$$H = \sum K_i \cdot D_i \quad (1.2)$$

де D_i – поглинута доза i -го виду іонізуючого випромінювання організмом людини; K_i – коефіцієнт якості i -го іонізуючого випромінювання.

Коефіцієнт якості враховує залежність ступеня біологічних наслідків від впливу різних видів радіоактивних випромінювань. Значення коефіцієнта наведені в табл. 1.1 [14].

В системі СІ одиниця еквівалентної дози – зіверт (Зв). Це одиниця еквівалентної дози будь-якого виду випромінювання в біологічній тканині, яке створює такий самий біологічний ефект, як і поглинута доза в 1 Гр (Грей) зразкового рентгенівського або γ -випромінювання. Вони за своєю природою відносяться до широкого спектру електромагнітних випромінювань [5].

Таблиця 1.1 – Коефіцієнт якості іонізуючих випромінювань

№ п/п	Види випромінювань	Значення коефіцієнта
1	Рентгенівське і γ -випромінювання	1
2	Електрони, позитрони і β -випромінювання	1
3	Нейтрони з енергією до 20 кеВ	3
4	Протони з енергією до 10 МеВ	10
5	Нейтрони з енергією 0,1 – 10 МеВ	10
6	α -випромінювання з енергією до 10 МеВ	20
7	Важкі ядра віддачі	20

Електромагнітні випромінювання утворюються під час руху електрично заряджених частинок з деякою частотою коливань, в результаті чого збуджується електромагнітна хвиля з такою самою частотою. В табл. 1.2 наведені основні характеристики деяких видів електромагнітних випромінювань.

Таблиця 1.2 – Основні види електромагнітних випромінювань

Вид випромінювань	Діапазон частот, Гц	Довжина хвилі, см
Радіо	$10^4 - 10^{11}$	$3,0 \cdot 10^4 - 0,3 \cdot 10^{-2}$
Інфрачервоне	$10^{11} - 4 \cdot 10^{14}$	$3,0 \cdot 10^{-2} - 7,5 \cdot 10^{-7}$
Світлове	$4 \cdot 10^{14} - 7,5 \cdot 10^{14}$	$7,5 \cdot 10^{-7} - 4,0 \cdot 10^{-7}$
Ультрафіолетове	$7,5 \cdot 10^{14} - 3,0 \cdot 10^{18}$	$4,0 \cdot 10^{-7} - 10^{-10}$
Рентгенівське	$3,0 \cdot 10^{18} - 3,0 \cdot 10^{20}$	$10^{-8} - 10^{-12}$
γ -випромінювання	$3,0 \cdot 10^{19} - 3,0 \cdot 10^{22}$	$10^{-11} - 10^{-14}$

Як видно з таблиці, серед широкого спектру випромінювань, найменшою довжиною хвилі і найбільшою частотою електромагнітних коливань характеризуються рентгенівське і гамма-випромінювання. Внаслідок чого, вони мають достатньо велику енергією випромінювання і при цьому найбільшу проникаючу здатність.

1.2 Біологічна дія іонізуючих випромінювань

Результатом дії радіоактивного випромінювання на живий організм може бути поява оборотних чи необоротних процесів, які призводять до складних біологічних наслідків. Величина таких шкідливих

змін залежить в першу чергу від дози опромінення, тривалості дії опромінення і біологічних особливостей організму.

Внаслідок прямої дії іонізуючого випромінювання на живий організм відбувається іонізація і збудження атомів і молекул речовини, дисоціація їх в результаті розриву хімічних зв'язків. Більш складні біологічні наслідки виникають у результаті біологічної дії випромінювань, коли проходять складні радіаційно-хімічні зміни викликані продуктами радіолізу води [2, 4, 6].

Основними особливостями дії іонізуючих випромінювань є велика ефективність поглинутої енергії, наявність прихованого періоду прояву дії опромінення, ефект кумуляції – накопичення малих доз, генетичні наслідки, частота опромінь та ін.

Відомо, що організм людини на 70 % складається з води. Внаслідок іонізації живих клітин утворюються вільні радикали Н і ОН, а в присутності кисню сильні окисники HO_2 і H_2O_2 . Ці радикали володіють високою хімічною активністю і вступають в реакції з молекулами білка, ферментів та інших структурних елементів біологічної тканини. Це призводить до зміни біохімічних процесів в організмі, порушення процесів обміну, придушення активності ферментних систем, сповільнення і припинення росту тканин, появи нових хімічних з'єднань нежиттєздатних організму – токсинів. Все це може викликати порушення життєдіяльності окремих функцій або систем організму в цілому [5].

Дію іонізуючого випромінювання на біологічні об'єкти підрозділяють на декілька етапів, які відбуваються на різних рівнях. Так на атомарному рівні відбувається початковий етап – іонізація і збудження, який триває 10^{-16} – 10^{-14} с. В подальшому внаслідок прямої або непрямої дії радіації спостерігаються зміни в молекулярній структурі опроміненого біологічного об'єкта. Його тривалість 10^{-10} – 10^{-6} с. Після цього фізикохімічний етап радіаційного впливу на живий організм закінчується і розпочинається біологічний [5].

Шкідливі зміни в організмі людини внаслідок радіаційного опромінення можуть проявлятися у вигляді клінічних ефектів, гострих променевих вражень, появою віддалених наслідків. Крім того, в організмі можуть проходити зміни структурних елементів, які відповіда-

ють за потомство (спадковість). Тому під час оцінки небезпеки опромінення, якому можуть наражатись окремі контингенти людей, радіаційні ефекти розділяють на соматичні і генетичні.

Специфіка біологічної дії іонізуючих випромінювань на живі організми полягає в тому, що викликаний ними радіаційний ефект зумовлений не стільки кількістю поглинутої енергії в опроміненому об'єкті, скільки самою формою передачі енергії. Індуційовані вільними радикалами хімічні реакції розвиваються з великим виходом і втягують у цей процес багато сотень і тисяч молекул, незачеплених випромінюванням.

1.3 Цементні бетони, як радіаційнозахисні матеріали

При будівництві ядерних установок, сховищ і контейнерів для радіоактивних сировини і відходів у вітчизняній і зарубіжній практиці широкого застосування набули цементні бетони. Це матеріал, який складається з елементів з малими і середніми атомними масами (друга група) і безпосередньо і побічно іонізуючих випромінювань. В окремих випадках влаштування біологічного захисту з використанням цементних бетонів при збільшенні товщини захисного екрану є ефективнішим ніж металеві- і свинцевоводні конструкції [7, 9, 20].

Значної популярності, порівняно з іншими будівельними матеріалами, цементні бетони набули завдяки високим конструктивним властивостям, легкості надання виробу або конструкції потрібної форми, дешевизні і доступності місцевих матеріалів, можливості змінювати спеціальні властивості шляхом підбору складу наповнювачів.

Внаслідок дії на матеріали радіаційнозахисних екранів іонізуючих випромінювань в них можуть відбуватись структурні і хімічні зміни, які супроводжуються зниженням фізико-механічних властивостей. Величина таких змін залежить від виду матеріалу і компонентного та енергетичного складу випромінювання. Тому в багатьох випадках при високій інтенсивності випромінювань і значній тривалості їхньої дії перед проектувальником стоїть завдання щодо використання в захисних екранах спеціальних радіаційностійких бетонів на наповнювачах і в'язучих з підвищеними захисними властивостями [7–20].

Під радіаційною стійкістю матеріалу розуміють здатність його виконувати свої функції і зберігати технологічні та фізико-хімічні пара-

метри в межах встановлених норм під час дії на нього іонізуючих випромінювань. Основним критерієм стійкості є граничне значення визначального параметра радіаційної стійкості. Показником радіаційної стійкості є значення характеристики поля іонізуючого випромінювання, яке діє на матеріал, при якому досягаються критерії радіаційної стійкості цього матеріалу або виробу [7].

Внаслідок дії випромінювань радіаційні зміни бетонів можуть проявлятися у вигляді розширення, розтріскування, зниженні міцності, модуля пружності та інших характеристик. Початкові зміни в бетонах на кварцових наповнювачах спостерігаються при флюенсах нейтронів $1\div 3 \cdot 10^{20}$ нейтрон/см² (нейтрони високих енергій – 10 кеВ і вищі) [7, 9].

Радіаційні дефекти в бетонах в першу чергу зумовлені змінами заповнювача, а особливо породоутворюючих мінералів. Зміни і порушення кристалічної структури нейтронами призводять до їх амортизації, що супроводжується анізотропними розширеннями (первинний ефект випромінювань). Вторинним радіаційним ефектом є розширення, розтріскування гірських порід, а як наслідок і бетону в результаті різного ступеню розширення і анізотропії розширення матеріалів, що входять до складу бетону.

За зростанням радіаційної стійкості поширені магматичні гірські породи можна розташувати в такому порядку: інтрузивні кварцевміщуючі (граніт, гранодіорит, кварцовий діорит), інтрузивні польовошпатові (діорит, сієніт, габро, лабрадорит), ефузивні (базальт, діабаз, андезит). Більш стійкими до дії випромінювань є дрібнокристалічні породи [7, 9–15].

Звичайний бетон з щільністю 2,0–2,5 т/м³ використовується як основний матеріал для біологічного захисту конструкцій стаціонарного енергетичного реактора. Заповнювачами, як правило, є пісок і щебінь, в якості в'язучого використовують портландцемент марок 300, 400, 500. Такий матеріал володіє достатньою щільністю і значним вмістом хімічно зв'язаної води, задовільними радіаційнозахисними властивостями. Захисні екрани виготовляють у вигляді збірних і монолітних залізобетонних конструкцій товщиною 0,25–2,5 м. В окремих випадках при обмеженні товщини стіни або перекриття виникає необхідність

використовувати ефективніші захисні матеріали з підвищеною об'ємною масою або із значним вмістом легких речовин.

До радіаційнозахисних бетонів з підвищеною щільністю відносяться особливо важкі бетони. Вони виготовляються на наповнювачах з істинною щільністю 3–7,8 т/м³. Це різні види металевих руд, проміжна сировина металургійної промисловості, штучні металеві наповнювачі (скрап, дріб).

Лимонітовий бетон виготовляють з використанням наповнювачів – лимонітових руд (мінерал групи гетиту $\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n \text{H}_2\text{O}$). Об'ємна маса бетону складає 2,8–3 т/м³. Міцність бетону 14–17 МПа. Особливість бетону – сполучення підвищеної щільності і значного вмісту хімічно зв'язаної води, що робить матеріал ефективним для змішаних α і γ -випромінювань. З метою підвищення щільності використовують комбінований наповнювач: лимонітова руда і металевий скрап. В результаті об'ємна маса підвищується від 3,5 до 4 г/см³ [9, 20].

В якості наповнювачів магнетитового і гематитового бетонів використовуються руди основу яких складають мінерал групи шпінелі магнетит Fe_2O_4 , мінерал групи корунду-ільменіту гематит Fe_2O_3 . Об'ємна вага бетону (ρ_6) складає 3,2–4,5 т/м³ і залежить від вмісту заліза у воді. Вода в бетоні міститься лише у вигляді води змішування. Якщо захист не вимагає підвищеного вмісту хімічно зв'язаної води, то матеріал можна використовувати при +500 °С [9].

Серед спеціальних бетонів також слід виділити хромітовий. Заповнювачем є хромітова руда, основу її складають мінерали групи шпінелі хроміт $(\text{MgFe})\text{Cr}_2\text{O}_4$. В руді також міститься кремнезем, глинозем, оксиди заліза. Об'ємна маса бетону складає 2,9–3,3 т/м³. Бетон використовується як жаростійкий і радіаційностійкий матеріал в умовах температур $t \leq 800$ °С і в якості радіаційнотеплового захисту реакторів на швидких нейтронах [17, 20].

До бетонів з підвищеним вмістом хімічно зв'язаної води (гідратні) відноситься серпентинітовий. Серпентинітові наповнювачі, які складаються з серпентиніту $3\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ з домішками Al_2O_3 , FeO , Fe_2O_3 , порівняно з лимонітом є кращими носіями водовміщуючого наповнювача, вони можуть містити до 13 % зв'язаної води. Об'ємна маса бетону (ρ_6) складає 2,2–2,3 т/м³, кількість хімічно зв'язаної води 12–15 %.

Значну кількість води матеріал втрачає при + 480 °С, робочою температурою вважається + 450 °С. з метою збільшення щільності бетону використовують комбіновані заліzosерпентинітові наповнювачі, при цьому $\rho_6 = 3,55 \text{ т/м}^3$, а товщина проникнення гама-випромінювань (λ_γ) зменшується на 41,3 %. Використовується такий бетон для будівництва радіаційнотеплового захисту [9, 20, 21–24].

Баритовий бетон відноситься до особливо важких матеріалів захисту. Наповнювачем є баритова руда (мінерал BaSO_4) з домішками кремнезему, глинозему і шкідливих домішок піриту та інших сірчистих з'єднань. Об'ємна маса бетону 3,0–3,6 т/м^3 , вода в матеріалі міститься у вигляді змішування, міцність бетону 16–30 МПа. Захисні властивості бетону від γ -випромінювань аналогічні бетонам із залізних руд, баритовий бетон при однаковій товщині трохи гірше послаблює нейтронні потоки і майже не викликає вторинного γ -випромінювання. Для збільшення кількості хімічно зв'язаної води використовують домішки лимонітової руди до 23 %, для підвищення щільності додають залізну руду і лом. Матеріал використовується в тих же випадках де і звичайний важкий бетон [17, 20–22].

Боровміщуючі бетони використовуються для захисту від нейтронних випромінювань і зниження температури радіаційного нагрівання захисного екрану. Боровміщуючі матеріали, як карбід бору, двоводний борат кальцію, датоліт, борацит, аморит, бура, колеманіт та інші, не повинні перевищувати в бетоні 15 % від маси цементу. В якості важких наповнювачів в таких бетонах використовуються серпентиніт, гематит, шамот, хроміт. Об'ємна вага бетонів 2,35–2,7 т/м^3 , міцність на стискання 20–50 МПа. Бор доцільно використовувати як домішок для бетонів, що працюють в умовах підвищених температур, коли важкі бетони втрачають вільну і частину хімічно зв'язаної води [24–28].

В роботі [29] відмічається про використання як радіаційнозахисного матеріалу бетонів з рідкоземельними елементами. Серед лантанодів, які є рідкоземельними металами, розрізняють такі як самарій, гадоліній, європій. Вони набули поширеного використання в реакторній техніці, оскільки мають великі ефективні перерізи взаємодії з випромінюванням. Такі спеціальні матеріали добре поглинають нейтронне випромінювання і мають задовільні показники екранування вторинного γ -випромінювання.

Інколи при доцільності використання бетонів з об'ємною масою 2,3–2,6 т/м³, із значною однорідністю щільності структури і хімічного складу можуть впроваджуватись базальтові бетони. Такий матеріал набагато ефективніший порівняно з бетоном на природних гравійно-галькових матеріалах для послаблення нейтронних випромінювань. Суміш бетону при укладанні в монолітні конструкції є важкоущільнюваною [17, 30].

Крім використання природних залізородних наповнювачів у будівництві широкого застосування набули штучні матеріали з високим вмістом заліза. Це відходи виробництва (шлаки, пил, окалина, обрізки, скрап); спеціально виготовлені обрізки, кульки, ролики, циліндрики з вуглецевих сталей; чавунний дріб, що використовується для очищення металів, частинки чавуну, які отримані при подрібненні відходів чавуну; криця, яка є металургійною сировиною, отриманою при збагаченні залізної руди.

Наведемо деякі характеристики окремих з перерахованих матеріалів [31]:

- окалина є дрібним наповнювачем, відходами металургійної промисловості з вмістом заліза біля 70 %, за гранулометричним складом відноситься до дрібних, пилюватих пісків;

- окатиші – це крупний наповнювач (20–30 мм), отриманий із залізородного концентрату шляхом грануляції і спікання, вміст заліза біля 60 %, об'ємна насипна вага $\geq 2,3$ т/м³;

- скрап використовується як крупний наповнювач з об'ємною насипною вагою 4,2–4,6 т/м³;

- залізородний концентрат-пісок отримують шляхом перемелювання і збагачення залізної руди, вміст заліза біля 60 %, об'ємна насипна вага 2,3–2,6 т/м³;

- чавунний дріб є дрібним наповнювачем (1,5 мм), який випускається згідно з ГОСТом 11964–81Е «Дробь техническая из чугуна и стали», об'ємна насипна вага 4,4 т/м³;

- чавунна стружка, як дрібний наповнювач з об'ємною вагою 2,3 т/м³;

- чавунне литво у вигляді кубиків розміром 10–80 мм;

- пил, отриманий з фільтрувальних пристроїв містить 75–95 % заліза, використовується як важкий наповнювач розчинів, або в комбінації з крупним в бетонах.

Стальні відходи машинобудівної промисловості також використовують в якості наповнювачів радіаційнозахисних складів. Але внаслідок забруднення маслами, ганчір'ям, не завжди знаходять застосування внаслідок складного очищення, яке потребує додаткових витрат.

Домішки в бетон стальних наповнювачів покращують його захисні, фізичні і технологічні властивості, але не всі однаковою мірою і не для усіх бетонів однаково. Механічні властивості бетонів на сталюму лемі дещо гірші порівняно із звичайним, хоча без особливих ускладнень можна отримати матеріал з об'ємною вагою $5,4 \text{ т/м}^3$. В роботі [32] показано, що використання відходів від подрібнення крупного заповнювача і чавунного дробу, як дрібного заповнювача дозволяє отримати щільність $6,8 \text{ т/м}^3$.

У вигляді штучних наповнювачів захисних бетонів використовуються шлаки, отримані при виплавці свинцю, з вальц-печі, шлаки, які утворені при виплавці міді в шахтних печах. Вони легко кришаться, крупність частинок складає $1\text{--}100 \text{ мм}$. Ці матеріали мають велику кількість оксидів кальцію і магнію, які в умовах відвалів поступово гасяться. Використовуючи шлаки отримують бетон міцністю $32,5\text{--}44 \text{ МПа}$ і щільністю $2,58\text{--}2,78 \text{ г/см}^3$ [32–38].

В якості в'язучих для радіаційнозахисних бетонів використовуються портландцемент, глиноземистий і гіпсоглиноземистий, магнезіальний та інші. Рекомендації відносно використання портландцементів наводяться в роботах [17, 39–45]. Портландцементний камінь при опроміненні не змінює геометричних розмірів, коефіцієнту лінійного розширення, ваги.

Є також дані [41–46] про використання напруженого цементу. Такий вид в'язучого дозволяє компенсувати або повністю виключити характер напруженого стану бетону і зменшує ймовірність появи тріщин в контактній зоні цементного каменя і заповнювача. Внаслідок використання напруженого цементу в бетоні підвищується вміст хімічно зв'язаної води.

При будівництві ядерних установок в США використовується магнезіальний цемент ($70 \% \text{ Mg} + 30 \% \text{ MgCl}_2$). Цей цемент використовується і в деяких інших країнах, але в обмеженій кількості. Протягом останнього часу в зарубіжній і вітчизняній практиці значного поширення отримав портландцемент в якості в'язучого бетонів, як найбільш доступний і дешевий матеріал.

2 ТЕХНОЛОГІЧНІ ПАРАМЕТРИ СТВОРЕННЯ БТЕЛУ-М ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ РАДІАЦІНО-ЗАХИСНИХ МАТЕРІАЛІВ

2.1 Сировинні матеріали

Широкий спектр спеціальних властивостей цементних бетонів (електропровідність; здатність розсіювати електричну енергію; підвищені радіаційно-екрануючі характеристики) обумовлений використанням в якості провідникового компонента в складі суміші порошків металів.

Внаслідок високих радіаційно-захисних характеристик металу від іонізуючого випромінювання, застосування його як наповнювача дозволяє отримувати композиційний матеріал із заданими спеціальними властивостями для різних енергій випромінювань.

На сьогоднішній день порошки металів і різних сплавів знаходять широке застосування в порошковій металургії, для отримання електропровідних полімерів, паст, клеїв тощо [46–51]. Існує також інформація про електропровідні металосилікатні матеріали [52–54].

Використання в якості важкого наповнювача металевих порошків, отриманих шляхом переробки металобрухту металургійними методами, не завжди є економічно вигідним. Це пояснюється значними енерговитратами і великою вартістю самого виробничого процесу. Тому одним із актуальних завдань дослідників є отримання нових ефективних матеріалів і сировини шляхом переробки і очищення металовмісних відходів.

У якості важкого провідникового наповнювача в електропровідному металонасиченому бетоні використовуються відходи виробництва шарикових підшипників. Це дрібнодисперсні шлами сталі ШХ–15. Хімічний склад сталі згідно з літературними даними [55] і результатів рентгено-флуоресцентного аналізу (РФА виконаний в ІПМАН України) наведений в табл. 2.1 і табл. 2.2.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад сталі ШХ–15 за ГОСТ 801–86

Елемент	C	Mn	Si	Ni	S
Вміст, %	0,95–1,05	0,2–0,4	0,17–0,37	0,3	0,02 ≤
Елемент	Cr	P	Cu	Fe	Zn
Вміст, %	1,3–1,65	0,027 ≤	0,25 ≤	86,3–87,96	6,79–7,27
Елемент	W	Au	Pb	V	Mo
Вміст, %	0,76–0,92	0,076–0,092	0,21–0,32	0,1 ≤	0,1 ≤

Таблиця 2.2 – Хімічний склад сталі ШХ–15 після термообробки протягом 1,2 годин при 900 °С за результатами РФА

Складові елементи	Види шламу	
	шлам після обкатки	шлам обпилювальний
	%	%
C	1,34	1,72
O	2,14	3,51
Cr	1,06	0,64
Mn	0,25	0,25
Si	0,31	0,41
S	0,06	0,075
P	≤0,03	≤0,03
Fe та ін.	Інше	Інше

Згідно з проведеними оптичними дослідженнями, середній розмір частинок металевих шламів становить $2-10^{-5}$ м. Питому поверхню дрібнодисперсних порошоків визначали методом проникаючого повітря на пристрої ПСХ–4 і за формулою А. С. Ладінського [56]. В результаті дослідження отримані значення $146-243$ м²/л, що відповідає середньому розміру частинок $10^{-5}-10^{-6}$ м.

Дрібнодисперсні шлами сталі ШХ–15 отримані в результаті складного технологічного процесу виробництва шариків на підшипникових заводах. Складовими процесу є холодне штампування, швидкісне механічне обпилювання (обдирання), обкатка (шліфовка карбідними зернами), закалювання, відпуск, тверде шліфування, доведення і поліровка. Під час виробництва використовується мокре шламівідведення відходів турбулентним потоком змашувально-охолоджувальної рідини (ЗОР). Склад залежить від процесу виробництва, технологічні особливості операцій кожного з яких впливають на механічні властивості порошоків шламів і їх розміри (табл. 2.3) [57].

В залежності від способу збереження відходів вони можуть бути різними. Так металеві порошки, що використовуються безпосередньо із спеціальних ємностей, куди вони відводяться потоком ЗОР під час виробничих операцій, характеризуються незначним ступенем окислення. І навпаки, окисленими є шлами, які тривалий час зберігаються у відкритих відвалах. Загальним для обох видів є залишки ЗОР на верхній частинці металу.

Таблиця 2.3 – Фізико-механічні властивості шламових відходів сталі ШХ–15

Складові ЗОР по операціях	C _{Fe} , %		d×10 ³ , кг/м ³	5×10 ³ , м ² /кг	r _{max} ×10 ⁻⁶ , м
	вихідний метал	порошок			
1. Обкатка шариків					
Емульсія на таловому маслі, сода, нітрит натрію	60,1	90,5	5,9	0,7	45,0
2. Шліфування шариків					
Дизельне пальне, стеарин	75,0	83,7	4,5	1,0	7,5
Вода, триетаноламін, нітрит натрію	29,4	85,4	5,0	1,5	10,0
Вода, сода, нітрит натрію	54,0	89,5	6,7	2,0	15,0
Вода, сода, нітрит натрію, фосфат натрію	80,5	95,4	7,2	0,5	27,0
3. Шліфування жолоба					
Емульсія НГЛ–205, триетаноламін, олеїнова кислота	23,0	66,0	4,2	0,6	35,0

Особливістю шліфування шламів порівняно з металевими порошками, отриманими металургійним шляхом, є сам виробничий процес. Внаслідок обробки металу при високій температурі і на повітрі відбувається процес окислення або корозії металу, який інколи називають окалиноутворенням [58]. Під впливом високих температур, в процесі обробки, на поверхні металу утворюються такі три шари, які приблизно відповідають закису заліза (FeO), магнетиту (Fe₃O₄) і оксиду заліза (Fe₂O₃). Також в процесі відкритого зберігання внаслідок корозії утворюються юстит (розчин Fe₂O₃ в FeO) і лапідокрит (FeO(OH)) [21]. Хімічний склад кожного шару протягом часу може змінюватись.

Також позитивною відмінністю шліфувальних шламів сталі ШХ–15 є те, що вони мають значно виражену корозійну стійкість порівняно з іншими металевими порошками завдяки високому вмісту цинку і хрому.

Переробка (очищення) шламів сталі ШХ–15 може здійснюватись двома способами: відпалювання без доступу кисню при +500–700 °С і промиванням в лужному розчині. Шлами сталі ШХ–15 в якості наповнювачів радіаційно-захисних бетонів доцільно використовувати з відкритих відвалів. Високий вміст кисню в окисленому шарі металу при контакті з в'язучим може спричинити утворення підвищеного вмісту хімічно-зв'язаної води.

Гранулометричний склад порошоків шламу визначався шляхом розсіювання на фракції. В результаті експерименту встановлено, що частинки металу розміром від 80 до 200 мкм складають до 20 %, а менші 80 мкм – 80 %.

Насипна щільність сухого шламу дорівнює наближено 1300 кг/м³. Істинні щільності відпаленого і відмитого металевого порошку відповідно приблизно дорівнюють 4,7 г/см³ і 6,87 г/см³. Тобто для отримання металонасиченої композиції максимальної щільності доцільно використовувати мілкодисперсний порошок, очищений промиванням.

Відновлений в середовищі еногазу і очищений відпалюванням при $t = 500\text{--}700\text{ }^{\circ}\text{C}$ металевий порошок має темно-сірий колір, насипну щільність за ГОСТ 19440–74 – 1,42 г/см³, а після вібрації і струшування – 2,9 г/см³. Щільність самої сталі ШХ–15 дорівнює 7,8133–7,9198 г/см³.

В зразках металонасиченого бетону також використовувались залізні порошки, які виробляються в Україні, ГОСТ 9849–86. Вони отримуються з відходів металобрухту методами відновлення і розпилення розплавленого металу водою високого тиску або стислим повітрям і використовуються в основному під час виготовлення виробів методом порошкової металургії, для зварювальних робіт та інших цілей [59]. В залежності від способу виготовлення металеві порошки розподілені на дві групи: порошки залізні розпилені (ПЗР) і порошки залізні відновлені (ПЗВ). Класифікація порошоків наведена в табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Класифікація порошоків залізних згідно з ГОСТ 9849–86 і СТ СЕВ 5014–85 зміни № 1 від 1.05.90

Марка порошку за хімічним складом	ПЗВ1; ПЗВ2; ПЗВ3; ПЗВ4; ПЗВ5; ПЗР2; ПЗР3; ПЗР5				
За способом виготовлення	В – відновлений; Р – розпилений				
За гранулометричним складом по крупності зерен, мкм.	450	315	200	160	71
За насипною щільністю	22	24	26	28	30
Насипна щільність, г/см ³	2,1÷2,3	2,3÷2,5	2,5÷2,7	2,7÷2,9	2,9

*Наукове електронне видання комбінованого використання.
Можна використовувати в локальному та мережному режимах*

**Сердюк Василь Романович
Христич Олександр Володимирович
Лемешев Михайло Степанович**

**БЕТОНИ З ПІДВИЩЕНИМИ
РАДІАЦІЙНО-ЗАХИСНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено О. Христичем

Підписано до видання 5.05.2020 р. Зам. № Р2020-02
Видавець та виготовлювач – Вінницький національний технічний
університет, Інформаційний редакційно-видавничий центр.
Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ, ГНК, к. 114,
м. Вінниця, 21021, тел.: (0432) 59-85-32, 59-81-59.
press.vntu.edu.ua; *email*: kivc.vntu@gmail.com.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.