

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний авіаційний університет

А. О. Бєлятинський, К. В. Краюшкіна

**ФІЗИКО-ХІМІЧНА МЕХАНІКА
ДОРОЖНЬО-БУДІВЕЛЬНИХ
МАТЕРІАЛІВ**

Навчальний посібник

Київ 2016

УДК 544.016:625.861(075.8)
ББК 0311-03Я7
Б449

Рецензенти: *Є. Б. Угненко* – д-р техн. наук., проф. (Харківський національний автомобільно-дорожній університет);
О. О. Бакуліч – канд. техн. наук, проф. (Національний транспортний університет);
В. М. Першаков – д-р техн. наук., проф. (Національний авіаційний університет);

Рекомендовано вченою радою Національного авіаційного університету (протокол № 4/15 від 09.06.2015 р.).

Белятинський А. О.

Б449 Фізико-хімічна механіка дорожньо-будівельних матеріалів : навч. посібник / А. О. Белятинський, К. В. Краюшкіна. – К. : НАУ, 2016. – 244 с.

ISBN 978-966-932-013-1

Посібник присвячено вивченню взаємозв'язків матеріалів різних рівнів та з різними типами хімічних зв'язків складових компонентів, визначенню хімічних і фізичних основ процесів створення нових матеріалів і забезпеченню стійкості їх властивостей під впливом зовнішніх факторів. Розглядаються процеси раціонального використання матеріалів з місцевої сировини та побічних продуктів промисловості. Розроблення нових економічних технологій використання у виробництві та ремонтах доріг і аеропортів можливе за наявності глибоких знань матеріалознавства.

Для студентів, які навчаються за напрямом підготовки «Будівництво».

УДК 544.016:625.861(075.8)
ББК 0311-03Я7

ISBN 978-966-932-013-1

© Белятинський А. О.,
Краюшкіна К. В. , 2016
© НАУ, 2016

ЗМІСТ

ВСТУП	8
Розділ 1. ОСНОВИ ФІЗИКО-ХІМІЧНОЇ МЕХАНІКИ ДОРОЖНЬО-БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ	10
1.1. Наука фізико-хімічна механіка, її мета та завдання.....	10
1.2. Головні поняття фізико-хімічної механіки	11
1.2.1. Дисперсні системи	11
1.2.2. Дисперсні композиційні системи	13
<i>Питання для самоконтролю</i>	15
Розділ 2. МОЛЕКУЛЯРНО-КІНЕТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА СТРУКТУРА ДИСПЕРСНИХ СИСТЕМ	16
2.1. Атомна й електронна будова.....	16
2.2. Характеристика міжатомної взаємодії	17
2.3. Типи атомних зв'язків.....	19
2.4. Структуроутворення дисперсних систем.....	20
2.4.1. Структуроутворення дисперсних систем мінеральних в'яжучих речовин.....	23
2.5. Класифікація дисперсних систем з позицій фізико-хімічної механіки	26
2.6. Дисперсні системи природних матеріалів	29
<i>Питання для самоконтролю</i>	36
Розділ 3. СТРУКТУРА ТА ПРОЦЕСИ ВЗАЄМОДІЇ СКЛАДОВИХ ДОРОЖНЬО-БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ	37
3.1. Структура природних кам'яних матеріалів	37
3.2. Структуроутворення дорожньо-будівельних матеріалів.....	38
3.3. Міцність дорожньо-будівельних матеріалів	40
3.4. Фізико-хімічна взаємодія між компонентами в дорожньо-будівельних матеріалах.....	43
3.5. Класифікація дорожньо-будівельних матеріалів	47
<i>Питання для самоконтролю</i>	47

Розділ 4. НЕОРГАНІЧНІ В'ЯЖУЧІ РЕЧОВИНИ.

СТРУКТУРА ТА ВЛАСТИВОСТІ	49
4.1. Дисперсні системи неорганічних в'язучих.....	49
4.2. Класифікація неорганічних в'язучих речовин.....	51
4.3. Будівельне повітряне вапно.....	54
4.4. Магнезіальні в'язучі.....	57
4.5. Гідравлічні в'язучі матеріали.....	58
4.6. Основи фізико-хімічної взаємодії портландцементу з водою.....	63
4.7. Фізико-хімічні основи твердіння портландцементу.....	64
4.8. Структуроутворення портландцементу.....	66
4.9. Корозійна стійкість цементного каменю.....	71
4.10. Фізико-механічні характеристики портландцементу.....	73
4.11. Різновиди портландцементу.....	75
<i>Питання для самоконтролю</i>	83

Розділ 5. ОРГАНІЧНІ В'ЯЖУЧІ РЕЧОВИНИ.

СТРУКТУРА ТА ВЛАСТИВОСТІ	84
5.1. Види органічних в'язучих речовин.....	84
5.2. Види бітумних в'язучих речовин.....	85
5.3. Хімічний склад бітумів.....	86
5.3.1. Груповий склад бітумів.....	87
5.3.2. Структура бітумів.....	90
5.4. Фізико-механічні властивості нафтових бітумів.....	91
5.5. Реологічні властивості бітумів.....	98
5.6. Бітуми модифіковані полімерами.....	98
Властивості БМП різних марок.....	100
5.7. Особливості взаємодії бітумів з мінеральними матеріалами.....	103
5.8. Вплив поверхнево-активних речовин на процес взаємодії бітуму з кам'яними матеріалами.....	108
5.9. Дьогтеві в'язучі речовини.....	112
<i>Питання для самоконтролю</i>	114

Розділ 6. ЕМУЛЬСІЇ БІТУМНІ ДОРОЖНІ,

ЇХ СТРУКТУРА ТА ВЛАСТИВОСТІ	115
6.1. Класифікація емульсій бітумних дорожніх.....	115

6.2. Структура емульсій бітумних дорожніх	117
6.3. Фізико-механічні властивості емульсій бітумних дорожніх	119
6.4. Дисперсність бітумних дорожніх емульсій залежно від способу отримання	124
6.5. Технологічні властивості емульсій бітумних дорожніх	127
6.6. Технологія застосування емульсій бітумних дорожніх	129
6.7. Литі холодні органо-мінеральні суміші	130
6.8. Ямковий ремонт асфальтобетонних покриттів холодними асфальтобетонними сумішами (на основі емульсій)	132
<i>Питання для самоконтролю</i>	134

Розділ 7. СТРУКТУРА ТА ВЛАСТИВОСТІ КОМПОЗИЦІЙНИХ ДОРОЖНЬО-БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ (НА ОСНОВІ НЕОРГАНІЧНИХ В'ЯЖУЧИХ)

7.1. Фізико-хімічні процеси структуроутворення композиційних матеріалів на основі неорганічних в'язучих речовин	135
7.2. Бетони на мінеральні в'язучих речовин – цементобетони	136
7.3. Структура цементобетону та її вплив на його фізико-механічні властивості	137
7.4. Класифікація бетонів	141
7.5. Властивості бетонної суміші та цементобетону	143
7.5.1. Реологічні властивості бетонної суміші	143
7.5.2. Фізико-механічні властивості бетонної суміші	145
7.5.3. Фізико-механічні властивості дорожнього цементобетону	148
7.5.4. Деформаційна стійкість дорожнього цементобетону	153
7.5.5. Морозостійкість дорожнього цементобетону як показник його довговічності	155
7.5.6. Корозійна стійкість бетону	156
7.6. Матеріали для виготовлення дорожнього цементобетону	157
7.7. Хімічні домішки для покращення властивостей дорожнього цементобетону	161
7.8. Фібробетон для дорожнього й аеродромного будівництва	165
7.9. Спеціальні види бетонів	170

7.10. Лита самоущільнювальна бетонна суміш	171
<i>Питання для самоконтролю</i>	172
Розділ 8. МАТЕРІАЛИ ДЛЯ РЕМОНТУ ЦЕМЕНТОБЕТОННИХ ПОКРИТТІВ	173
Розділ 9. СТРУКТУРА ТА ВЛАСТИВОСТІ КОМПОЗИЦІЙНИХ ДОРОЖНЬО-БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ОРГАНІЧНИХ В'ЯЖУЧИХ РЕЧОВИН	177
9.1. Складові компоненти асфальтового бетону	177
9.2. Фізико-хімічні процеси структуроутворення асфальтового бетону	179
9.3. Особливості формування структури асфальтового бетону	183
9.3.1. Фізико-хімічна взаємодія мінерального порошку з бітумом в асфальтовому бетоні	184
9.3.2. Особливості технології активації мінерального порошку	191
<i>Питання для самоконтролю</i>	193
Розділ 10. ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНІ РЕЧОВИНИ	194
10.1. Структура поверхнево-активних речовин	194
10.2. Види поверхнево-активних речовин за їх хімічною будовою	198
10.3. Вплив поверхнево-активних речовин на структуру та властивості бітуму	201
10.4. Реологічні властивості бітуму з додаванням поверхнево- активних речовин	204
10.5. Взаємодія бітумів і мінеральних матеріалів у присутності ПАР у композиційних матеріалах	205
<i>Питання для самоконтролю</i>	207
Розділ 11. КЛАСИФІКАЦІЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ОРГАНІЧНИХ В'ЯЖУЧИХ РЕЧОВИН	208
11.1. Асфальтовий бетон. Види та властивості	208
11.2. Асфальтополімербетон	215
<i>Питання для самоконтролю</i>	217

Розділ 12. РЕОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ АСФАЛЬТОВОГО БЕТОНУ	218
12.1. Дьогтебетон. Структура та властивості	220
12.2. Дьогтеполімербетон, його складові та властивості	222
12.3. Цементополімербетон, його складові компоненти та властивості	225
<i>Питання для самоконтролю</i>	226
Розділ 13. ХОЛОДНИЙ АСФАЛЬТОВИЙ БЕТОН	227
<i>Питання для самоконтролю</i>	231
Розділ 14. СПЕЦІАЛЬНІ ВИДИ АСФАЛЬТОБЕТОНІВ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬ У ДОРОЖНЬОМУ БУДІВНИЦТВІ	232
14.1. Лита бітумо-полімерна композиція для укладання тонкошарових покриттів	233
14.2. Дисперсно-армований асфальтобетон	237
14.3. Щебенево-мастиковий асфальтобетон	238
14.4. Фрезерований асфальтовий бетон	240
<i>Питання для самоконтролю</i>	241
ЛІТЕРАТУРА	242

ВСТУП

Автомобільні дороги й аеропорти є важливими складовими транспортної системи кожної країни. Вони забезпечують здійснення перевезень наземним і повітряним транспортом та дозволяють доставляти вантажі та пасажирів у різні куточки світу.

Соціально-економічний розвиток України, її інтеграція у світове співтовариство значною мірою залежить від розвитку транспортної інфраструктури, зокрема від рівня забезпеченості автомобільними дорогами.

Саме з розвитку автомобільних доріг починався вихід з економічної кризи багатьох країн світу. Так, США, Німеччина, Японія, які свого часу визначили розвиток дорожньої мережі серед основних пріоритетів економічної політики, у результаті отримали не тільки розвинений сегмент транспортної інфраструктури, але й стимулювали економічне зростання та досягли позитивних результатів у вирішенні проблем зайнятості населення.

Будівництво нових автомобільних доріг і аеродромів, забезпечення їх високого транспортно-експлуатаційного стану, своєчасне ведення робіт з реконструкції, ремонтів та експлуатаційного утримання неможливі без застосування сучасних будівельних матеріалів з високими фізико-механічними характеристиками.

У сучасному дорожньому й аеродромному будівництвах основними матеріалами для влаштування дорожніх одягів є: органічні та неорганічні в'язучі, щебеневі матеріали різного походження (гранітні, шлакові, вапнякові тощо), базальтоволоконні та полімерні матеріали та композити – асфальтобетон, полімерасфальтобетон, цементобетон, полімерцементобетон, орґано-, та емульсійно-мінеральні суміші, місцеві матеріали та відходи промисловості.

Структура, хімічний та мінералогічний склад компонентів, з яких виготовляють композиційні дорожньо-будівельні матеріали, а також їх взаємодія у сумішах забезпечують нормативні транспортно-експлуатаційні показники та довговічність дорожніх і аеродромних конструкцій.

Тому в сучасному матеріалознавстві процес забезпечення якості та стабільності властивостей дорожньо-будівельних матеріалів розглядають в контексті забезпечення стійкості фізико-хімічних процесів, що

відбуваються впродовж їх використання, з урахуванням впливу погод-но-кліматичних факторів.

Значний внесок у фізико-хімічну механіку дорожньо-будівельних матеріалів у напрямку визначення властивостей та створення високо-ефективних матеріалів з урахуванням фізико-хімічних процесів, які визначають їх структуру, особливості взаємодії, зробили вчені України, зокрема В. О. Золотарьов, В. В. Мозговий, К. К. Пушкарьова, В. К. Жданюк, Г. К. Сьоньї, І. З. Духовний та багато інших.

Здійснені дослідження не вичерпують проблеми вивчення фізико-хімічних процесів і зв'язків вихідних матеріалах з різними структурами, що виникають під час їх змішування і визначають механічні властивості композиційних дорожньо-будівельних матеріалів. Визначення хімічних і фізичних основ процесів створення нових матеріалів і забезпечення стійкості їх властивостей під впливом зовнішніх факторів залишається складним та актуальним завданням. Раціональне використання місцевої сировини та відходів промисловості, розроблення нових економічних технологій їх використання у будівництві та для ремонту доріг і аеродромів є резервом розширення асортименту дорожньо-будівельних матеріалів і зниження вартості виконуваних робіт.

Науковий напрям навчальної дисципліни «Фізико-хімічна механіка дорожньо-будівельних матеріалів» узгоджується із Законом України «Про пріоритетні напрямки науки і техніки в частині «Нові речовини і матеріали», а також з Постановою Кабінету Міністрів України від 07.09.2011 р. №942 «Створення та застосування технологій отримання нових речовин хімічного виробництва» (п.6.4).

Загалом, робота спрямована на участь у рішенні Постанови Кабінету Міністрів України №1130 від 12.09.2011 «Державна програма розвитку внутрішнього виробництва», у частині: проведення та впровадження науково-технічних розробок, необхідних для налагодження випуску вітчизняної наукоємної інноваційної конкурентоспроможної продукції для імпортозаміщення.

Автори справедливо вважають, що навчальний посібник не претендує на вичерпність рішень наведених положень. Деякі питання потребують подальшого теоретичного й експериментального обґрунтування. Однак автори сподіваються, що в представленому вигляді навчальний посібник буде сприяти поглибленому вивченню питань роботи дорожньо-будівельних матеріалів у конструкціях автомобільних доріг і аеродромів.

Розділ 1. ОСНОВИ ФІЗИКО-ХІМІЧНОЇ МЕХАНІКИ ДОРОЖНЬО-БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Створена академіком П. О. Ребіндером і його школою нова галузь науки – фізико-хімічна механіка – відкрила широкі можливості для розроблення механізмів регулювання різними властивостями (технологічними, міцностними) матеріалів з допомогою аналізу деформаційних процесів, що відбуваються в дисперсних системах, і є проявом особливостей будови утворюваних цими системами структур.

1.1. Наука фізико-хімічна механіка, її мета та завдання

Наука фізико-хімічна механіка включає в себе положення молекулярної фізики (фізика твердого тіла) механіки матеріалів і фізичної хімії (фізико-хімія поверхневих явищ і дисперсних систем).

Фізико-хімічна механіка дорожньо-будівельних матеріалів (ДБМ) – це наука, яка вивчає зв'язок між складом, структурою і властивостями матеріалів, закономірності їх змін під впливом механічних факторів, розробляє шляхи та методи вдосконалення їх стану для отримання ДБМ з властивостями, що забезпечать довговічність дорожніх і аеродромних конструкцій.

Розвиток теоретичних основ фізико-хімічної механіки дорожньо-будівельних матеріалів дає змогу спеціалістам, ще на стадії проектування об'єкту, використовувати не тільки традиційні матеріали, але й вирішувати питання удосконалення технічних характеристик ДБМ, визначати фізико-хімічні закономірності отримання матеріалів із заданими властивостями, попередити й уповільнити механізм їх руйнування в конструкціях.

Б. В. Дерягін, Г. І. Фукс, В. М. Єременко, В. О. Золотарьов, В. А. Веренько зробили значний внесок у розвиток фізико-хімічної механіки контактних взаємодій у дисперсних системах і композиційних матеріалах.

Були розроблені експериментальні методи дослідження властивостей дисперсних систем і сумішей та їх регулювання введенням

поверхнево-активних речовин, створені нові технології отримання композиційних дорожньо-будівельних матеріалів.

Накопичений досвід дає можливість систематизувати відомості про види структур і властивості дисперсних систем як складових, так і композиційних матеріалів, визначити критерії їх міцності та довговічності під дією транспортного навантаження і природно-кліматичних факторів.

Таким чином, мета фізико-хімічної механіки ДБМ – створення систем (матеріалів) з оптимальними фізико-механічними властивостями з урахуванням фізико-механічних процесів, що перебігають упродовж об'єднання різних компонентів як в об'ємі, так і на поверхні розподілу фаз.

Для досягнення мети фізико-хімічної механіки ДБМ необхідно вирішити такі завдання:

- вивчити закономірності фізико-механічних процесів формування різних ДБМ із заданими властивостями та структурою;
- вивчити фізико-хімічні закономірності змін механічних властивостей ДБМ у процесі експлуатації з установленням причин виникнення і розвитку деформацій під впливом навантаження і зміни температури зовнішнього середовища;
- встановити взаємозв'язок між складом, властивостями та структурою матеріалів з розробленням раціональної технології використання з урахуванням впливу механічних і природно-кліматичних факторів;
- визначити можливості ефективного використання ДБМ поліфункціонального призначення;
- врахувати фізико-хімічні особливості матеріалів, розробити композиційні ДБМ оптимального складу для забезпечення якості та довговічності дорожніх і аеродромних конструкцій в умовах сучасного руху автомобільного транспорту та повітряних суден.

1.2. Головні поняття фізико-хімічної механіки

1.2.1. Дисперсні системи

Дисперсними називають системи, які складаються з багатьох дрібних (колоїдних) часток, які знаходяться у рідкому, твердому та газоподібному станах.

Характерними ознаками таких систем є висока дисперсність та гетерогенність, тобто неоднорідність складу. Неоднорідність походження та властивостей компонентів, що входять до складу дисперсних систем, зумовлює їх агрегатну нестійкість, незважаючи на досить малі розміри дисперсних колоїдних часток.

Речовину, у якій розподіляються тонкі частки, називають *дисперсним середовищем*, а речовину, розподілену в об'ємі середовища, називають *дисперсною фазою*.

Дисперсна фаза – це частина дисперсної гетерогенної системи, відокремлена поверхнями розподілу фаз, яка характеризується однаковими фізичними властивостями в усіх точках.

Структурування дисперсних систем – це складний фізико-хімічний процес.

Дисперсна структура являє собою просторовий каркас, що складається з різномірних, хаотично розміщених зростків окремих кристалів. Умови зростання та пакування кристалів визначають пористість дисперсної структури.

Міцність дисперсних структур залежить не тільки від міцності складових часток, а й від того, чи міцно вони зчеплені між собою, тобто чи міцні між ними контакти. Установлення контакту між частками – складний процес, пов'язаний з їх взаємодією на малих відстанях (порядку молекулярних) і зумовлений різними силами.

Дисперсні системи можуть виявляти схильність до діалізу, тобто з допомогою напівпроникної перегородки (мембрани) можуть бути відокремлені від розчинених у них домішок низькомолекулярних речовин. У процесі діалізу відбувається проникнення молекул дисперсійного середовища через мембрану, а колоїдні частки, нездатні проникати крізь напівпроникну перегородку, залишаються за нею у вигляді розчину.

У дисперсних системах іноді може відбуватись явище електрофорезу, що виявляється в перенесенні частинок дисперсної фази в електричному полі до того або іншого електроду. Це означає, що частки дисперсної фази можуть мати електричний заряд. Слід зазначити, що під час електрофорезу перенесення речовин відбувається тільки в одному напрямку.

Для дисперсних систем характерним є процес злипання дисперсних часток, які є не молекулами, а агрегатами молекул, з утворенням під дією міжмолекулярних сил (фізична адсорбція, електрофорез), ще крупніших, з яких складають високомолекулярні або полімерні речовини. Розміри молекул таких речовин в окремих випадках, перевищують розмір складових часток.

Дисперсні системи є агрегативно стійкими лише за хімічної взаємодії активних речовин дисперсної фази з речовиною, що знаходиться у вигляді адсорбційного шару на поверхні складових часток. Це забезпечує стабільність властивостей дисперсних систем будівельних матеріалів.

У дорожньому будівництві дисперсними системами є всі дорожньо-будівельні матеріали, які умовно можна поділити на прості (мінеральні й органічні в'язучі, бітумні емульсії) і складні багатокомпонентні – дорожні бетони.

1.2.2. Дисперсні композиційні системи

Дисперсні композиційні системи – це системи, які складаються з двох і більше різнорідних структуроутворюючих компонентів і характеризуються властивостями, які не мають їх вихідні складові.

Дисперсною фазою тут є структуроутворюючі компоненти – щебінь, пісок, мінеральний порошок.

Дисперсійним середовищем – безперервною фазою, матрицею є мінеральні в'язучі, затворені водою або органічні в'язучі, що з'єднують складові дисперсної фази в єдиний моноліт. Кількісне співвідношення структуроутворюючих компонентів (дисперсної фази) є важливою ознакою структури, за однакового характеру поверхневих фізико-хімічних взаємодій, складових компонентів, від цього залежать фізико-механічні властивості композиційних систем.

До дисперсних композиційних систем, що використовують у шляховій і аеродромній галузях відносять матеріали на основі органічних і неорганічних в'язучих (асфальтовий бетон, цементний бетон тощо), оскільки вони складаються з двох і більше складових, що взаємодіють між собою завдяки різним поверхням розподілу.

Асфальто- і цементобетони з додаванням полімерних матеріалів і дисперсно-армувальних волокон, які являють собою суцільну гетерогенну систему, що складається з наповнювача і безперервної фази – полімерної матриці. А також бетони, у яких використовують композиційні в'язучі (органічні та мінеральні), наприклад, бітум-цемент, бітум-сірка, бітум-кальцієві мила жирних кислот тощо.

З позицій фізико-хімічної механіки дисперсних систем структура дорожніх бетонів (асфальто- та cemento-) може бути охарактеризована як коагуляційно-кристалізаційна, капілярно-пориста. Процеси, які перебігають упродовж експлуатації дорожніх бетонів, тобто під дією сезонних коливань температури, змін вологості та стану навколишнього середовища, конструктивні та деструктивні перетворення, що супроводжуються зміною пористості та водопоглинання, низка дослідників визначає як структуроутворення.

Згідно із законами термодинаміки, несумісність двох видів в'язучих речовин у бетонах зумовлює неспроможність створення в суміші навіть у будь-яких співвідношеннях, стійкої однофазної системи, тобто речовини можуть об'єднуватись, тільки утворюючи колоїдні дисперсії і емульсії.

Дана умова може бути виражена таким термодинамічним рівнянням:

$$T\Delta S = \Delta H, \quad (1.1)$$

де ΔS і ΔH – зміни структур у процесі змішування; T – температура.

Окрім того, на термодинамічну несумісність вказує відхилення залежності фізико-механічних властивостей (в'язкості, модуля пружності) суміші в'язучих речовин різного складу. Термодинамічно несумісними є матеріали, які мають відхилення в коефіцієнтах температурного розширення більші за 10 % і мають різну дисперсну структуру.

Усі вищезазначені особливості характерні для складових компонентів дорожньо-будівельних матеріалів, що зазвичай є термодинамічно несумісними та дисперсними за характером з'єднання в композит.

За наявності в структурі композиційних систем термодинамічно несумісних в'язучих речовин тут утворюються самостійні фази, які взаємно впливають одна на одну. Оскільки кожне в'язуче зберігає вихідний вид структурних зв'язків. Для композиційних систем характерна наявність, щонайменше, двох зв'язків різної природи.

Таким чином, можна сформулювати визначення композиційних дорожньо-будівельних матеріалів з позицій фізико-хімічної механіки. Дорожньо-будівельні матеріали – це композитні системи, що мають структуру з комплексним набором зв'язків різної міцності та деформативності, чітка межа між якими на макрорівнях не спостерігається.

За визначенням В. А. Веренько, композиційні системи – це «композит в композиті» і утворюються після додавання в композитну матрицю (асфальто- та цементобетон) нових матеріалів (сірки, полімеру, волокон), що утворюють свою поверхню розподілу, де розподілення мікрочасток і агрегатів суттєво відрізняється від гомогенної.

Питання для самоконтролю



1. Які завдання необхідно вирішити для досягнення мети фізико-хімічної механіки ДБМ?
2. Що таке дисперсна фаза?
3. Які матеріали відносять до дисперсних композиційних систем?
4. Дайте визначення дорожньо-будівельних матеріалів з позицій фізико-хімічної механіки.

Розділ 2. МОЛЕКУЛЯРНО-КІНЕТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА СТРУКТУРА ДИСПЕРСНИХ СИСТЕМ

2.1. Атомна й електронна будова

Загальновідома сьогодні модель будови атома була створена в кінці 18 – на початку 19 століття завдяки залежності, відкритій Нільсом Бором (1885–1962).

Згідно з цією залежністю атом складається з розміщеного в центрі ядра, навколо якого по орбітах обертаються електрони. Діаметр атомного ядра становить близько 10^{-15} м, а розмір атома – 10^{-10} м. Атомне ядро містить у собі практично всю масу атому та несе позитивний електричний заряд усіх електронів атома. Загалом, атом електрично нейтральний. Порядковий номер атома Z (зарядкове число) визначає його місце в періодичній системі. Воно дорівнює позитивному заряду ядра (числу протонів) і від'ємному заряду електронів.

Нільс Бор визначив, що:

- в атомі є стаціонарні орбіти, рухаючись по яких електрон не випромінює енергії і не вбирає її;
- перехід з одного стаціонарного стану в інший супроводжується випромінюванням або вбиранням енергії;

Оболонки атомів у міру зближення зарядів ядер заповнюються електронами у визначеній послідовності – від внутрішніх (ближчих до ядра) оболонок до зовнішніх. Енергетичний стан кожного окремого електрону характеризують чотири квантові числа:

- головне n ($n=1, 2, 3, \dots$);
- азимутальне l ($l=0, 1, 2, \dots, n-1$);
- магнітне m_l ($m_l=-l, \dots, -1, 0, +1, \dots, +l$);
- спинове m_s ($m_s=+1/2, -1/2$).

Головне квантове число визначає кругову орбіту, якою рухається електрон і послідовно набирає значень чисел натурального ряду: 1, 2, 3 тощо. Відповідно до цих значень головного квантового числа оболонки позначають латинськими літерами: K, L, M тощо.

Арнольд Замерфельд (1868–1951) показав, що орбіта електрона, яка визначається головним квантовим числом не обов'язково по-

винна бути круговою, можуть бути електричні орбіти з різними відношеннями великої і малої осей.

Ці оболонки розділюють на підоболонки відповідно до значень азимутального квантового числа $L=0, 1, 2, \dots, n-1$. Найбільш низький енергетичний рівень з $l=0$ відповідає круговій орбіті (або підоболонці), вищим значенням l відповідають еліптичні орбіти. Так, у М-оболонці ($n=3$) разом із круговою орбітою ($l=0$) існують ще дві еліптичні орбіти ($l=1$ і $l=2$). Ці орбіти позначають літерами: S, p, d, f і т. ін.

Магнітне квантове число m_l характеризує взаємну орієнтацію окремих орбіт і за даного азимутального квантового числа l може набирати $2l+1$ різних значень.

Спинове квантове число (або «спин») m_s для кожного електрона може набирати тільки два значення $+1/2$ і $-1/2$. Спин – це безпосередньо момент обертання електрона навколо своєї осі під час його руху навколо ядра.

2.2. Характеристика міжатомної взаємодії

Можливість існування речовин у твердому стані зумовлена виникненням сил взаємодії між структурними частками під час наближення їх на досить малі відстані. Такими частками є атоми, іони або молекули.

Для виникнення стійкої структури твердого тіла необхідно, щоб між частками діяли двоякі сили: сили притягіння, які перешкоджають віддаленню часток одна від одної і сили відштовхування, які не дозволяла часткам злитися одна з одною.

Сили притягіння виникають у результаті взаємодії електронів з позитивно зарядженим ядром власного атома, а також з позитивно зарядженими ядрами сусідніх атомів.

Сили відштовхування виникають в результаті взаємодії позитивно заряджених ядер сусідніх атомів за їх наближення. Сили відштовхування проявляються за сильного наближення і зростають інтенсивніше, ніж сили притягіння. Сила відштовхування залежить від відстані між ядрами та від міри екранування їх електронними оболонками. Вона досягає значної величини на малих відстанях і стрімко спадає зі збільшенням відстані.

Сили відштовхування, зумовлені взаємодією ядер, є найбільш вагомими під час наближення легких атомів, ядра яких порівняно

слабко екрановані електронними оболонками (рис. 1.2, *a*). У разі взаємодії важчих атомів, ядра яких екрановані значно сильнішими електронними оболонками, сили відштовхування, які діють унаслідок перекриття заповнених електронних оболонок наближених атомів (рис. 1.2, *б*).

На відстані $r = r_0$ сили відштовхування зрівноважують сили тяжіння, і результуюча сила взаємодії $F_{\text{рівн}}$ перетворюється у нуль (рис. 1.2, *в*), а енергія взаємодії E досягає мінімального значення $E_{\text{св}}$ (рис. 1.2, *г*). Тому стан часток на відстані r_0 є станом стійкої рівноваги, унаслідок чого частки повинні вишиковуватися у чіткій послідовності на відстані r_0 одна від одної, утворюючи тіло правильної внутрішньої структури (кристалічної).

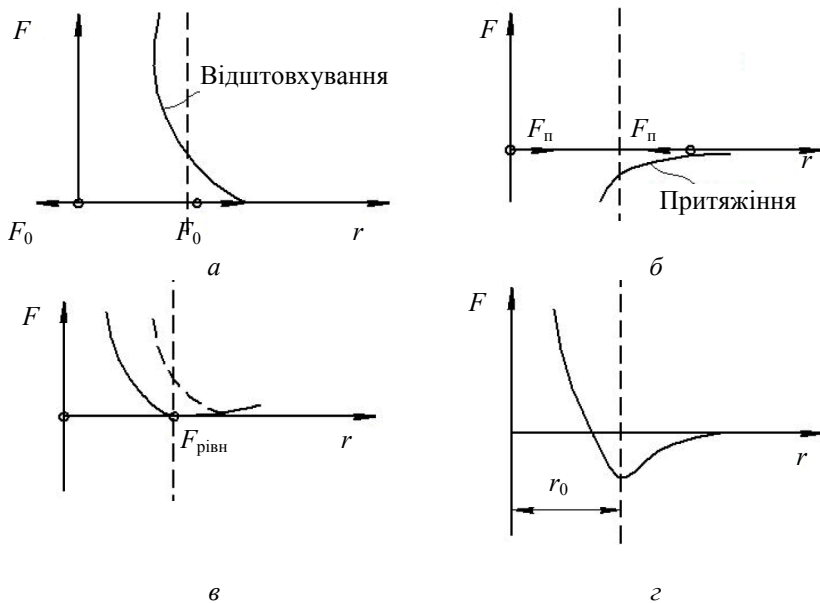


Рис. 1.2. Зміна сили взаємодії (*a*, *б*, *в*) і енергії зв'язку (*г*) під час наближення атомів у кристалі

Така структура буде зберігатися доти, поки енергія зв'язку залишається вищою за абсолютним значенням, за енергію теплового руху часток. Частки кристалу не можуть вільно виходити з рівноваги, оскільки віддаляючись від цих положень енергія часток збільшується і з'являються сили, які намагаються повернути їх у

стан рівноваги. Частки наче закріплені в стані рівноваги та здійснюють коливання біля цього положення. У всіх тілах існує міжатомне притягіння. Якщо б таке притягіння було відсутнє, то кожний атом був би незалежним від інших, матеріали не були б цілісними і не могли б чинити опір прикладеним зовнішнім силам.

Аморфний стан менш стабільний, ніж кристалічний. Аморфні тіла від нагрівання розм'якшуються у широкому температурному інтервалі, стають в'язкими, а потім переходять у рідкий стан. Під час нагрівання або тривалого витримування за кімнатної температури і у деяких випадках за деформації твердий матеріал може переходити частково або цілком в аморфний стан.

Виникнення і величина сил взаємодії між частками, що утворюють речовину, залежать від типу їх зв'язків.

2.3. Типи атомних зв'язків

Розрізняють чотири основні типи атомних зв'язків.

Перші три типи зв'язків – іонний (електростатичний, гетерополярний), ковалентний (гомополярний) і металевий – називають *первинними зв'язками*. Вони відносно міцні. Тип і сила зв'язку визначає електронна будова атомів, які взаємодіють. Кожний із цих зв'язків виникає внаслідок обміну або з'єднання валентних електронів, що знаходяться на S- і P-орбітах.

Четвертий тип зв'язку – зв'язок Ван-дер-Ваальса виникає в результаті взаємодії кількох, слабших, але важливих сил притягіння. Слабкі сили Ван-дер-Ваальса зумовлені слабкою взаємодією близько розміщених атомів, і їх вплив можна не враховувати за наявності сильніших іонних, ковалентних або металевих зв'язків. У деяких випадках може діяти не один тип зв'язку, а кілька.

Завдяки існуванню стабільних зв'язків (між парою ізолюваних атомів або між атомами у великому тримірному кристалі) повна енергія просторової конфігурації позитивних іонних остовів і зовнішніх електронів менша, ніж для будь-якої іншої конфігурації, включно з випадком переміщення атомів на нескінчену відстань. Різницю енергії такої конфігурації порівнянно з енергією ізолюваних атомів називають *енергією зв'язку*.

2.4. Структурування дисперсних систем

Дослідження фізико-хімічних факторів, які визначають структурно-механічні властивості дисперсних систем – твердих тіл – і способи регулювання процесами створення і формування просторової структури композицій, відбувається з врахуванням впливу зовнішнього середовища, характеру напруженого стану, хімічного складу та структури твердого тіла (будови дисперсної структури у вигляді просторового каркасу та будови кристалічної решітки).

Термін «структура твердого тіла» слід розглядати як просторову сітку, яка складається з різних елементоутворювальних кінетичних одиниць і може бути правильною в дійсно твердих тілах (кристалічна решітка) чи хаотичною – у гелях, студнях (коагуляційний каркас) і багатьох склоподібних тілах.

Згідно із цим визначенням існують дальній і ближній порядки розміщення (правильність розташування) молекул або атомів у тілах на далекій відстані або в безпосередній близькості від центральної молекули. Це чітко визначають методом дифракції рентгенівських променів або електронних пучків з довжиною хвилі, яка знаходиться в одному вимірі з молекулярними відстанями в системі, що розглядається.

Релаксаційні процеси залежать від хаотичного теплового руху часток, що формують дану дисперсну систему, і перебігають без будь-якого зовнішнього впливу.

Сутність лише в тому, що в період релаксації (час, за який напругу зсуву (Θ) вимірюють в $e=2,718$ разів) або час, протягом якого пружня напруга спадає на певну помітну величину, є різним у різних тіл. Для $\tau \leq \Theta$ (τ – час спостереження або досліду) рідина поводить себе як тверде тіло, а для $\tau > \Theta$ – як рідина, тобто першочергово виникла пружня деформація переходить у залишкову, причому вона зберігається після зняття напруги.

Установлення контакту між колоїдними частками в дисперсних системах пов'язане з їх взаємодією на молекулярних відстанях і зумовлене силами різної природи. Згідно з П. О. Ребіндером, залежно від характеру сил притягання, які діють між колоїдними частками, розрізняють такі типи контактів зрощення часток у дисперсних системах (утворення структури) (рис. 2.1): коагуляційний, точковий і фазовий.

Коагуляційна структура виникає під дією молекулярних сил зчеплення колоїдних часток, які беруть участь в інтенсивному

броунівському русі (малих) і більших структуроутворюючих елементів, що знаходяться в рідкому дисперсійному середовищі суспензій чи колоїдних розчинів. Вона характеризується порівняно незначною міцністю і зменшеною кількістю залишкових тонких прошарків рідини в місцях контакту між твердими частками, які зчеплюються.

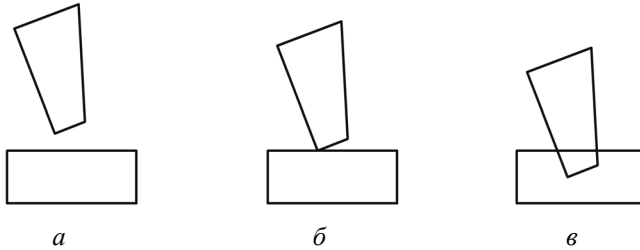


Рис. 2.1 Три типи контактів у дисперсних системах
a – коагуляційний; *б* – точовий; *в* – фазовий

Таким коагуляційним структурам притаманні тиксотропні властивості, тобто здатність до зворотнього відновлення після механічного або іншого виду руйнувань. Коагуляційний характер дисперсних структур найбільш яскраво виявляється в суспензіях з малим об'ємним вмістом твердої фази.

У суспензіях є достатня кількість твердих часток в одиниці об'єму, але висока дисперсність. Окрім того, тверді частки як правило анізодіаметричні або з неоднорідною поверхнею. У процесі розвитку коагуляційного скелету в контактах між такими частками знаходиться тонкий прошарок рідкого дисперсійного середовища, товщина якого відповідає мінімуму вільної енергії системи. Цей прошарок визначає міру коагуляційного зчеплення, і відповідно, міцність суспензії, її повзучість (навіть за найменших напруг зсуву), пластичність, структурну в'язкість, пружню післядію та інші структурно-реологічні та структурно-релаксаційні характеристики.

Високоеластична післядія в суспензіях визначається орієнтованістю анізодіаметричних часток, яка насамперед залежить від прикладеного напруження зсуву. Взагалі, міцність дисперсних структур суспензій, особливо низькоконцентрованих і середньо концентрованих паст, залежить від міцності елементарних контактів і їх кількості в одиниці об'єму.

Якщо ж вміст твердих часток (фази), й відповідно, міцність коагуляційної структури збільшені, її механічне руйнування стає незворотним і вже не супроводжується тиксотропним відновленням за наявності колоїдної фракції.

Прикладом таких матеріалів можуть бути висушені пасти, відпресовані (напівсухим способом) керамічні маси та концентровані суміші (прес-порошки). У таких структурах виявляються, розвиваються точкові (атомні) або псевдокоагуляційні контакти середньої міцності (див. рис. 2.1), іноді коагуляційно-конденсаційні за характером.

Упродовж подальшого зменшення кількості рідкого дисперсного середовища (перехід до формування пластичних композиційних паст) відбувається відновлення міцності дисперсійного середовища після руйнування. Однак цей процес має місце тільки в умовах значно розвинутої пластичної деформації і напругах, які діють по всій поверхні. Взагалі, усі процеси структуроутворення в дисперсних системах можуть бути зведені до чотирьох основних типів кінетичних кривих, які показані на рис. 2.2.

Найбільш розповсюдженою з них є S-видна сигмоїда (крива 1а) на якій зазвичай розрізняють процеси індукції (А), прискорення (Б) і уповільнення (В). Ці процеси описує логічна функція. Перед їх перебігом відбувається індукційний період, протягом якого не вдається виявити ознак початку перебігу процесів індукції, прискорення, уповільнення. У процесі індукції можливе повторення індукційних періодів, і перебіг реакції відбувається за законами періодичних процесів (крива 1 б).

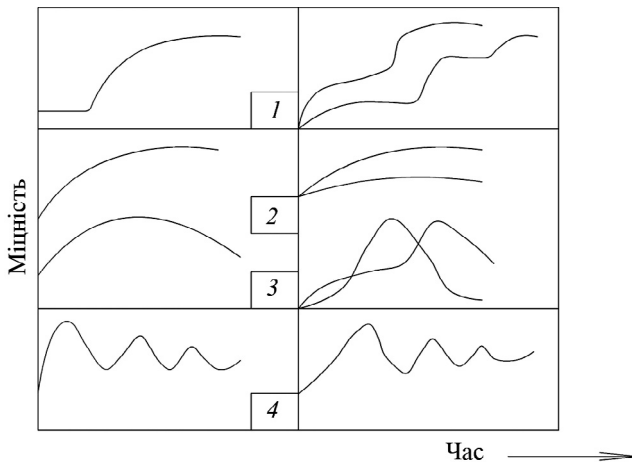


Рис. 2.2. Основні типи кінетичних кривих структуроутворення:
a – найбільш розповсюджений вигляд кривої; *б* – можливі варіанти);
 1 – індукційний; 2 – наростаючий; 3 – екстремальний;
 4 – хвилеподібний (коливальний)

Криві 2 (а, б) відповідають законам першого, другого або подрібненого порядків. Реакція перебігає без самоприскорення з періодом наростання (А) і уповільнення (В). Екстремальний характер кінетичної кривої 3 зумовлений зменшенням міцності в пізні терміни структуроутворення, викликані дією сил, як внутрішнього, так і зовнішнього походження. Криві 4 зустрічаються досить рідко і ще мало вивчені. У той самий час хвилеподібний (коливальний), з часом згасальний характер кінетики твердіння являє з теоретичного погляду найбільший інтерес.

На сьогодні не визначено, чи є такий характер універсальним, присутнім у будь-якій кінетичній кривій, чи являє самостійне явище, властиве окремим системам. При цьому кожному з перерахованих вище типів контактів зростання відповідає своя характерна крива структуроутворення або спеціальна ділянка на ній.

2.4.1. Структуроутворення дисперсних систем мінеральних в'язучих речовин

О. Є. Шейкін виходив з того, що в основі гідратаційного твердіння лежить процес перетворення вихідних безводних або маловодних з'єднань у гідратні новоутворення, які мають меншу розчинність, ніж вихідні речовини. Завдяки цьому протягом затворення порошку-цементу виникає пересичений розчин, з якого гідрати виділяються у вигляді кристалів. Згідно зі Ле-Шательє чим більшою мірою закристалізовані процеси твердіння, тим вища міцність дисперсної структури, яка утворилась.

Згідно з Ребіндером і Михайловим процес структуроутворення цементно-водної дисперсії може бути поділений на два періоди: формування і зміцнення структури. Спочатку в результаті розчинення вихідного матеріалу утворюється перенасичений розчин щодо нової фази – кристалогідратного новоутворення, що складається з багатьох дрібних кристалів. Останні термодинамічно більш стійкі за даних умов і тому менш розчинні у воді. Поступово кристали зростаються між собою, і коагуляційна структура переходить спочатку в коагуляційно-кристалізаційну, а потім – у кристалізаційну. Після закінчення гідратації в каркасі, який утворився, розвивається самоплинний процес перекристалізації.

Зміцнення такої дисперсної структури відбувається у разі виникнення контактів, які забезпечують утворення кристалів достатньої величини за мінімальних внутрішніх напруг.

Кінетична крива структуроутворення в дисперсних системах мінеральних в'язучих речовин складається з чотирьох стадій і наведена на рис. 2.3.

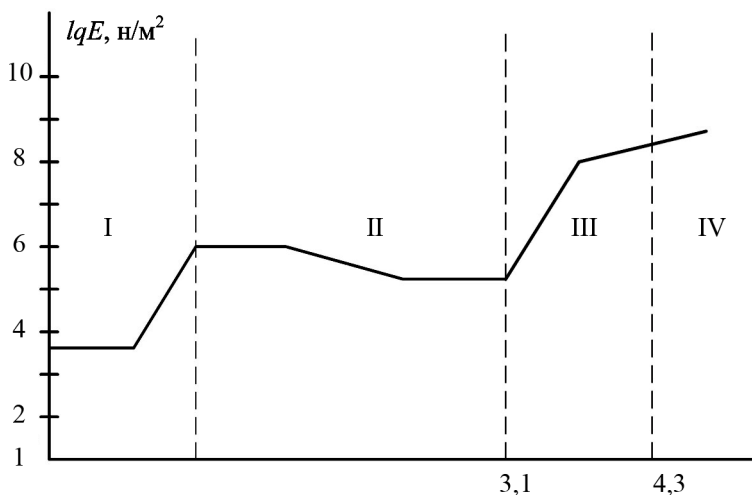


Рис. 2.3. Повна крива кінетики структуроутворення мінеральних в'язучих речовин; I-IV

Перша стадія – інтенсивна гідратація. За інтенсивної гідратації має місце максимальна швидкість процесу, який виявляється в коагуляції колоїдних часток і утворенні до кінця цієї стадії просторового каркасу коагуляційної структури, який містить частки вихідних речовин (наприклад, клінкера) вкритих гідратними новоутвореннями.

Така перебудова системи супроводжується зростанням електричної провідності та рН середовища, тепловиділенням та ущільненням системи (збільшення концентрації). Останнє пов'язане з тим, що малі частки та структурні елементи проникають у простір між великими агрегатами сітки, унаслідок чого збільшується компактність дисперсій.

Друга стадія – розвиток просторової коагуляційної структури. Процеси структуроутворення і гідратації на початку стадії уповільнені, міра гідратації незначна, виявляються деструктивні явища. Збільшення рН і електропровідності свідчить про наявність значної кількості вільних іонів. Уповільнення розгляданого процесу у дру-

гій фазі зумовлене утворенням навколо цементних зерен оболонки із продуктів гідратації, які перешкоджають подальшому доступу води та вільних іонів до непрогідратованих часток клінкера. У цей період відбуваються деструктивні явища – спад значень модуля швидкої еластичної деформації і перехід гідратних новоутворень у термодинамічно стійкіші форми.

Третя стадія – утворення просторового каркасу коагуляційної структури, про що свідчить зростання модуля пружності та тепло-виділення. Коагуляційні контакти переростають у кристалізаційні, при цьому значно підвищується міра гідратації. Величина рН і електропровідності зменшується, оскільки вільні іони H^+ і OH^- вступають у гідратні кристалічні з'єднання. Розрив оболонки і прискорений період реакції знов лімітується швидкістю хімічної взаємодії в'язучої речовини з водою. Агрегативна стійкість знижується. Енергія активації процесу структуроутворення мінімальна.

Четверта стадія – характеризується незначним збільшенням пружності та міцності за найменшої швидкості гідратації. Процес знову перебігає у дифузійній ділянці. Система прагне до зрівноваженого стану.

Таким чином, упродовж чотирьох стадій структурних періодів спостерігається зміна перебігу реакцій агрегативної стійкості виниклих структур нової фази, енергії активації структуроутворення і стану дисперсій. Кінцева міцність визначається остаточною структурою, оптимальним співвідношенням гелю, кристалів і мікропор.

Окрім того, необхідно додати, що модулі швидкої еластичної деформації (E) у першій і другій фазах змінюються в межах 10^3 – 10^5 Н/м², відбувається розвиток повільних високоеластичних деформацій з періодом ретардації близько $(1+3) \times 10^2$ с, що свідчить про коагуляційний характер структури в цих фазах. У третій і четвертій фазах E коливається в межах 106–109 Н/м², при цьому суттєво зменшується період ретардації високоеластичних деформацій, що підтверджує утворення переважної кількості кристалізаційних структур на даних етапах твердіння. Тобто відбувається формування коагуляційно-кристалізаційної структури, характерної для більшості дорожньо-будівельних матеріалів.

2.5. Класифікація дисперсних систем з позицій фізико-хімічної механіки

Дисперсні системи класифікують за:

- агрегатним станом фаз;
- інтенсивністю молекулярних взаємодій на межі розподілу фаз (колоїдних розчинів);
- зв'язком дисперсної фази та дисперсійного середовища;
- розмірами часток дисперсної фази.

Класифікація дисперсійних систем за агрегатним станом фаз вперше була запропонована В. Освальдом, який визначив 9 комбінацій дисперсної фази та дисперсного середовища в різних станах. Ця класифікація наведена в табл. 2.1).

Таблиця 2.1

Класифікація дисперсних систем

Дисперсна фаза	Дисперсійне середовище	Умовне позначення системи	Назва системи
<i>Дисперсійні системи в газах</i>			
Газ	Газ	г/г	Колоїдна дисперсність неможлива Туман дим, пил
Рідина	Газ	р/г	
Тверде тіло	Газ	т/г	
<i>Дисперсійні системи в рідинах</i>			
Газ	Рідина	г/р	Піна, газова емульсія Емульсія Колоїдний розчин
Рідина	Рідина	р/р	
Тверде тіло	Рідина	т/р	
<i>Дисперсійні системи у твердих тілах</i>			
Газ	Тверде тіло	г/т	Тверда піна, пористе тіло Тверда емульсія Твердий золь, сплав
Рідина	Тверде тіло	р/т	
Тверде тіло	Тверде тіло	т/т	

В. О. Золотарьов, за розподілу дисперсних систем за агрегатним станом врахував їх взаємодію на межі розподілу фаз і розміри складових часток та їх властивості (табл. 2.2).

Таблиця 2.2

Властивості дисперсних та молекулярних систем

Тонко- та грубодисперсні $\delta = 10^{-4} - 10^{-7} \text{ м}$	Колоїдно-дисперсні $\delta = 10^{-7} - 10^{-9} \text{ м}$	Молекулярні та іонні розчини $\delta < 10^{-9} \text{ м}$
Непрозорі, відбивають світло	Прозорі, розсіюють світло, опалесценцюють	
Частки не проходять крізь паперовий фільтр	Частки проходять крізь паперовий фільтр	Частки проходять крізь паперовий фільтр
Частки затримує целофан	Частки затримує целофан	Частки проходять через целофан
Гетерогенні	Гетерогенні	Гомогенні
Нестійкі	Відносно стійкі	Цілком стійкі
Частки, видні в оптичний мікроскоп	Частки, видні в електронний мікроскоп	Частки, невидні в сучасні мікроскопи

Усі дисперсні системи, що мають колоїдну дисперсність називають *золями*. Системи рідина–газ (р/г) і тверде тіло–газ (т/г) мають загальну назву *аерозолів*.

Колоїдні системи з рідким дисперсійним середовищем газ–рідина(г/р), рідина–рідина (р/р) і тверде тіло–рідина (т/р) називають *ліозолями* (від грец. ліоз – рідина) (табл. 2.1).

Колоїдними вважають частки діаметром $\delta < 0,1$ мкм, чи $\delta < 10^{-5}$ см – дрібнодисперсні, якщо $\delta > 1$ мкм чи $\delta > 10^{-4}$ – грубодисперсні.

Частки розмірами $\delta < 1$ мкм виявляють помітний броунівський рух. Седиментація (осадження) часток діаметром $\delta < 0,1$ мкм під дією сили ваги практично зрівноважується броунівським рухом, тобто їх дифузіїєю.

Діаметр частинок.....більший як 1 мкм.....0,1–1 мкм....менший як 0,1 мкм

Система.....грубодисперсна.....з проміжною дисперсністю.....колоїдно-дисперсна (мікрогетерогенні)

Класифікація дисперсних систем (колоїдних розчинів) за інтенсивністю молекулярних взаємодій на межі розподілу фаз наведена в таблиці 2.1. Тут враховується здатність сухого залишку, отриманого протягом випаровування, розчинятись (диспергуватись) у дисперсійному середовищі.

Системи, сухий залишок яких нездатний самовільно диспергуватись у дисперсійному середовищі, називають *необоротними ліофобними колоїдними системами – коагелями* (наприклад, коагелі металів, гідрозолі йодиду срібла та ін.).

Ліофобні – нестійкі та поступово руйнуються, виділяючи дисперсну фазу внаслідок коагуляції – укрупнення її часток під дією молекулярних сил зчеплення.

Системи, сухий залишок яких унаслідок з'єднання з дисперсним середовищем набрякає і самоповільно розчиняється з утворенням дисперсії, називають *оборотними, ліофільними колоїдними системами* (наприклад, розчин желатини у воді або каучуку у бензолі).

Ліофільні системи стійкі та стабільні у часі.

Класифікація дисперсних систем за характером зв'язків у дисперсійній фазі.

За характером зв'язків у дисперсійній фазі дисперсні системи поділяють на вільнодисперсні (золі) і зв'язнодисперсні (гелі). Вільнодисперсні системи (золі) – це системи, у яких частки дисперсної фази не зв'язані в одну суцільну сітку та здатні незалежно одна від одної переміщуватися в дисперсійному середовищі під впливом теплового руху або сили ваги (розведені суспензії, емульсії, аерозолі), плинні та мають усі властивості, характерні для рідини.

Зв'язнодисперсні системи (гелі) – це системи, у яких частки дисперсної фази зв'язані одна з одною молекулярними силами. Вони утворюють у дисперсійному середовищі своєрідні просторові сітки або каркаси (структури). Структуроутворюючі елементи можуть виконувати тільки коливальні рухи – концентровані суспензії (пасти), концентровані емульсії, порошки.

У вільнодисперсних і зв'язнодисперсних системах відбуваються процеси коагуляції, як прямої – перехід золю в стан гелю, так і зворотної – утворення золю з гелю. Зворотню коагуляцію називають *пептизацією*. Схема, за якою відбуваються ці процеси, наведена на рис. 2.4.

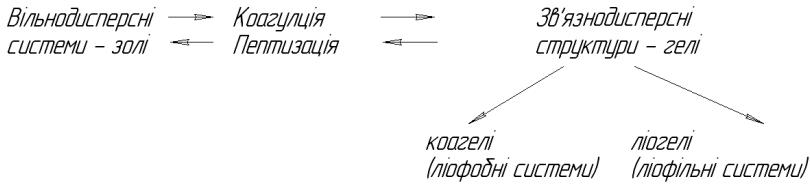


Рис. 2.4. Схема процесів коагуляції і пептизації

2.6. Дисперсні системи природних матеріалів

Структурування і властивості дисперсних систем природних матеріалів найбільш чітко проглядаються в дисперсіях глини у воді.

У працях П. О. Ребіндера, Н. Н. Серб-Сербиної і колег визначено, що дисперсії глини у воді утворюють коагуляційні структури – просторові сітки різної міцності, у яких частки глини в місцях контактів розділені залишковими тонкими прошарками водного середовища. Це зумовлює механічні властивості таких структур, а саме міцність, пружність, еластичність, пластичність, в'язкість.

Залишкові прошарки водного середовища тут відіграють роль мастильних матеріалів і визначають разом з тим рухомість окремих елементів структури, її пластичність і повзучість навіть за найменших наруг зсуву. Еластичні властивості коагуляційних структур глинистих мінералів аналогічні до властивостей полімерів.

Вандервальсові сили молекулярного притягання часток глини діють через прошарки води, що значно їх послаблює, тому міцність таких коагуляційних структур менша порівняно з міцністю, яка досягається за безпосереднього зчеплення часток глини в місцях контактів.

Деформації, які виникають у таких структурах, є зворотними, вони повільно розвиваються і повільно припиняються.

Загалом, міцність коагуляційних структур, які утворюються у водних дисперсіях глинистих мінералів, визначає кількість вільних часток і кількість контактів зчеплення. Зі збільшенням товщини прошарків води, тобто товщини дифузійної обкладки подвійного шару іонів, міцність структури знижується.

У системі глина–вода важливим є визначення взаємодії води з твердою фазою (частками глини). Навколо часток глини вода утворює кілька шарів – молекулярний, дифузійно-подвійні шари іонів, так звану «гідратну оболонку» та перебуває у вільному стані, тобто мобілізована в самій коагуляційній структурі. Адсорбована вода першого молекулярного шару є зв'язною водою. Вода дифузійних подвійних шарів іонів, яка утворює так звану «гідратну оболонку», зв'язана досить слабо. Вільна вода є незв'язною, вона мобілізована в коагуляційній структурі дисперсії і її складно витіснити внаслідок високої дисперсності цієї структури. У гідрофобних суспензіях, які утворюють контактну коагуляцію з крупними агрегатами, кількість іммобілізованої води досить невелика. Під час переходу до більш гідрофільних дисперсних систем кількість її зростає внаслідок раптового збільшення кількості контактів упродовж переходу від компактної коагуляції до суцільної коагуляційної структури – гелю.

Численні дослідження механічних властивостей коагуляційних структур дисперсій глин і глинистих мінералів показали, що процеси розвитку деформацій у часі $\epsilon = f(\tau)$ за постійних напруг зсуву P (рис. 2.5) описує рівняння з'єднаних послідовно механічних моделей Максвелла-Шведова та Кельвіна.

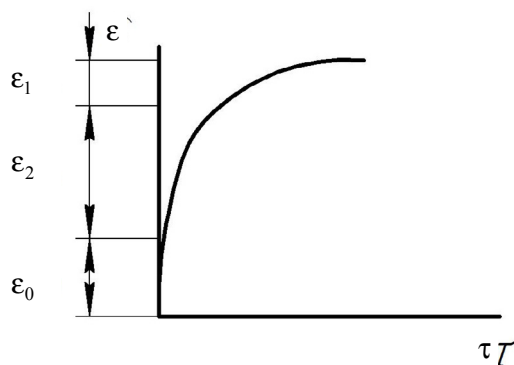


Рис. 2.5. Крива деформації, де ϵ – час за постійного навантаження ($P = \text{const}$) дисперсій глинистих мінералів, ϵ_0, ϵ_2 – швидка і повільна еластичні; ϵ_1 – пластична деформація за час $\Delta\tau=900$ сек.

$$\varepsilon' = \varepsilon'_0 + \varepsilon'_1 \tau + \varepsilon'_2 = \frac{P}{E_1} + \frac{P - P_{k1}}{\eta_1} \tau + \frac{P}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2 \tau}{\eta_2}}\right) \quad (2.1)$$

З рівняння (2.1) випливає, що механічні властивості коагуляційних структур дисперсій глин і глинистих мінералів можуть бути схарактеризовані п'ятьма важливими показниками: модулем швидкої еластичної деформації E_1 , модулем повільної еластичної деформації E_2 , умовною статичною межею текучості P_{k1} , найбільшою пластичною (шведівською) в'язкістю η_1 і еластичною в'язкістю η_2 . З допомогою цих показників можна розрахувати основні структурно-механічні характеристики дисперсій: еластичність $\lambda = \frac{E_1}{E_1 + E_2}$, пластичність $\frac{P_{k1}}{\eta_1}$ і період дійсної релаксації $\Theta = \frac{\eta_1}{E}$ де $\frac{1}{E} = \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2}$. Ці характеристики, безпосередньо пов'язані з технологічними властивостями дисперсій глинистих мінералів і представлені у вигляді критерію $\frac{\lambda}{\frac{P_{k1}}{\eta_1} \Theta_1}$, можуть слугувати для оцінки якостей дисперсій дорожньо-будівельних матеріалів.

Рівняння (1) вказує також на те, що за навантажень коагуляційних структур відбувається одночасно розвиток трьох видів відносних деформацій: швидкої еластичної $\varepsilon'_0 = \frac{P}{E_1}$, повільної еластичної $\varepsilon'_2 = \frac{P}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{\tau E_2}{\eta_2}}\right)$ і пластичної $\varepsilon'_1 \tau = \frac{P - P_{k1}}{\eta_1} \tau$, які розрізняють за механізмом дії і тривалістю розвитку. На діаграмі (рис. 2.6) наведений розвиток відносних деформацій у коагуляційних структурах дисперсій глин і глинистих мінералів.

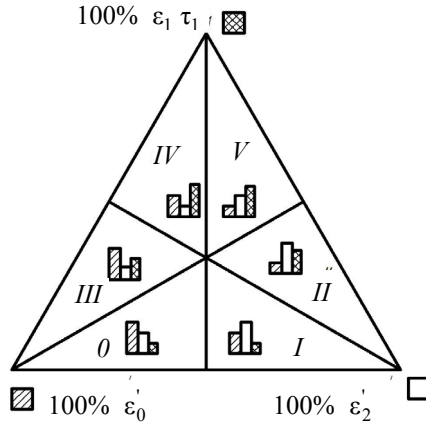


Рис. 2.6. Діаграма розвитку відносних деформацій, 0–V – структурно-механічні типи: ϵ_0 – швидка еластична деформація; ϵ_2 – повільна еластична деформація; $\epsilon_1 \tau_1$ – пластична деформація

За напруги зсуву вищій за межу текучості з'являється пластична (залишкова) деформація, яка після завершення повільної і швидкої еластичної деформацій веде до утворення в результаті одночасного розширення і тиксотропного відновлення коагуляційної структури, міра руйнування цієї структури визначає надлишок напруги зсуву над межею текучості.

Детальні дослідження процесів структуроутворення водних дисперсій глинистих мінералів показують, що тут часто має місце вибіркове зчеплення часток за найбільш ефективних для даних умов контактів і внаслідок цього, – будова структури зі значною кількістю або навіть із надлишком контактів певного виду. Однорідність контактів зростає у міру зменшення концентрації системи.

Основним фактором, який визначає структурно-механічний тип дисперсій, є кристалічна структура глинистого мінералу, форма часток, їх дисперсність і кількість порушень цілісності структури.

У разі введення інертних наповнювачів, наприклад, піску, відбуваються значні зміни в коагуляційних структурах глинистих мінералів. Це стається внаслідок того, що сили молекулярної взаємодії між частками піску та глини значно менші, ніж між частками глини, прикладання зовнішніх сил викликає відносно вільніше

переміщення в межах повільної еластичної деформації. Домішки піску, зерна якого значно більші за частки глини, перешкоджають ковзанню останніх одна відносно одної, однак переміщення зерен піску (наприклад, під час перемішування з глиною) супроводжується місцевим руйнуванням коагуляційної структури, що прискорює розвиток пластичної деформації.

Механічне оброблення глин з домішками наповнювачів, змінює орієнтованість часток глинистих мінералів і створює анізотропну структуру, значною мірою змінюючи їх структурно-механічний тип.

Загалом, розвиток деформаційних процесів водних дисперсій глин і глинистих мінералів, або створення різних структурно-механічних типів дисперсій цих речовин, залежить від характеру утворення одиничних контактів часток одна з одною. Ці контакти, своєю чергою, залежать від форми часток, міри зруйнованості їх поверхні і порушень кристалічної структури мінералу.

Придатність до використання в будівництві дисперсних систем – глин і глинистих мінералів – визначають за їх основними гідрофільними структурно-механічними властивостями.

Властивості глинистих мінералів різних родовищ наведені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Гідрофільні та структурно-механічні властивості паст глинистих мінералів

Мінерал	Гідрофільні властивості			Структурно-механічні властивості				
	T , мг*екв/ 100 г	Q , кал/г	Q/T , егр/г	C , %	$E_2 * 10^6$, од/см ²	E_2 , %	$\frac{\epsilon_0}{\epsilon_1 \tau}$	E_ϵ
Каоніліт глуховецький	3,8	1,0	4,18	71,8	18	38,1	2,89	12,6
Каолініт глухівський	25,8	9,6	40,13	63,8	45	31,2	0,89	3,3
Галуазит	6,6	4,2	17,56	68,5	82	30,0	0,67	11,9
Монтморилоніт черкаський	70,8	23,4	97,81	67,0	43	31,0	1,03	1,2
Гідрослюда черкаська	9,4	13,3	55,59	65,0	230	14,4	1,82	5,3
Гідрослюда квасівська	31,8	8,7	36,37	71,0	54	31,4	1,08	3,6
Палигорскіт	24,5	25,4	106,17	49,0	135	17,8	0,21	3,3

T – ємність катіонного обміну;

Q – теплота змочування;

Q/T – енергетичний критерій гідрофільності;

C – концентрація дисперсної фази;

$E_2 \cdot 10^{-6}$ – питома енергія зв'язку;

E_2 – модуль повільної еластичної деформації;

E_ϵ – модуль швидкої еластичної деформації;

$\frac{\epsilon_0'}{\epsilon_1 \tau}$ – співвідношення між швидкими еластичними та пластичними деформаціями;

ними деформаціями;

$\frac{E_\epsilon}{Q} 10^2$ – співвідношення швидкої еластичної деформації і теплоти змочування.

Існує зв'язок між енергетичним критерієм гідрофільності (Q/T) і структурно-механічними характеристиками коагуляційних структур паст глинистих мінералів, а саме E_ϵ і E_2 , які відображають характер розвитку деформаційного процесу в глинистих мінералах (рис. 2.7, 2.8).

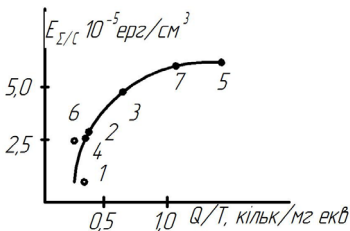


Рис. 2.7. Залежність питомої енергії зв'язку E_ϵ / C від величини енергетичного критерію гідрофільності Q/T для глинистих мінералів: 1 – каолінит глуховецький; 2 – каолінит глухівський; 3 – галуазит; 4 – монтморилоніт черкаський; 5 – гідрослюда черкаська; 6 – гідрослюда квасівська; 7 – палигорскіт

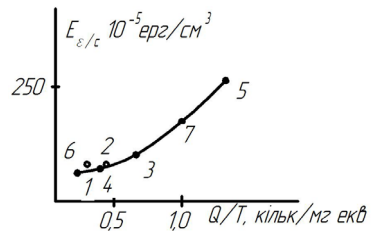


Рис. 2.8. Залежність модуля повільної еластичної деформації E_2 від величини енергетичного критерію гідрофільності Q/T для глинистих мінералів: 1 – каолінит глуховецький; 2 – каолінит глухівський; 3 – галуазит; 4 – монтморилоніт черкаський; 5 – гідрослюда черкаська; 6 – гідрослюда квасівська; 7 – палигорскіт

Механізм утворення міцних коагуляційних структур глинистих мінералів забезпечує залежність між енергетичним критерієм гідрофільності та розвитком повільних пластичних деформацій ϵ'_2 / C (табл. 2.2, рис. 2.9).

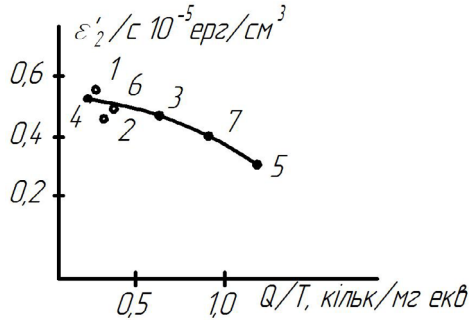


Рис. 2.9 Залежність коефіцієнта еластичності ϵ'_2 / C від величини енергетичного критерію гідрофільності Q/T для паст глинистих мінералів: 1 – каолініт глуховецький; 2 – каолініт глухівський; 3 – галуазит; 4 – монморилоніт черкаський; 5 – гідрослюда черкаська; 6 – гідрослюда квасівська; 7 – палигорскіт

У міру зростання міцності структури кількість повільних еластичних деформацій зменшується, тобто зменшується кількість контактів між частками.

Співвідношення між швидкими еластичними та пластичними деформаціями $\frac{\epsilon'_0}{\epsilon_1 \tau}$ (табл.2.3) визначають форма та дисперсність

часток і змінюється у міру переходу від пластинок з чіткою огранкою (каолініт і гідрослюда) через безформені частки (морилоніт) до віддалених кристалів (галуазит і палигорскіт).

Таким чином дисперсна структура природних матеріалів на прикладі глинистих мінералів може розглядатись як фізико-хімічна система, яка під впливом зовнішніх факторів (механічні, погоднокліматичні) намагається досягти найбільш повного використання своєї внутрішньої енергії, що виявляється в оптимізації властивостей і довговічності системи.

Питання для самоконтролю



1. Назвіть чотири квантові числа, які характеризують енергетичний стан кожного окремого електрона.
2. Схарактеризуйте сили притягіння в структурі твердого тіла.
3. Назвіть чотири основні типи атомних зв'язків.
4. Що таке структура твердого тіла?
5. Які існують типи контактів зростання часток у дисперсних системах?
6. Як відбувається процес структуроутворення цементоводної дисперсії?
7. Назвіть класифікацію дисперсних систем за характером зв'язків у дисперсній фазі.

Розділ 3. СТРУКТУРА ТА ПРОЦЕСИ ВЗАЄМОДІЇ СКЛАДОВИХ ДОРОЖНЬО-БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

3.1. Структура природних кам'яних матеріалів

Структуру кам'яних матеріалів визначає хімічна будова молекул (кристалів), у яких атоми розміщуються таким чином, що загальна потенційна енергія системи є мінімальною. Вони можуть бути кристалічної або аморфної структур. Ідеальний кристал має просторову решітку розміщення атомів, іонів і молекул, яку характеризує стійкість. Аморфна структура менш стійка та за відповідних умов може переходити у кристалічну.

У реальних кристалічних системах структура має багато ознак ідеальної, що зумовлено наявністю дефектів у будові речовин (мікропористість і різні викривлення кристалічної решітки). Дефекти концентруються на поверхнях розділу – поверхневих шарах і на межі зростаць мікрочасток – мікрокристалічних шарах).

Структура природних кам'яних матеріалів (граніту, вапняку) і глини (грунту) наведена на рис.3.1.

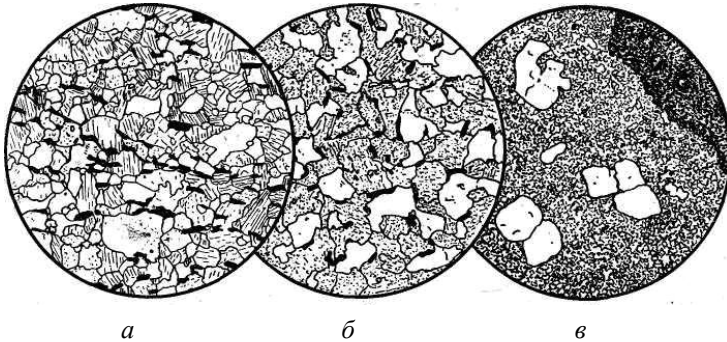


Рис. 3.1. Структура природних кам'яних матеріалів:

- a* – аплітова структура та гнейсовидна текстура в мікрограніті;
- б* – аплітова структура та масивна текстура в мікрограніті;
- в* – граніт-порфірова структура та масивна текстура в граніт-порфірі

Структура граніту (рис. 3.1, *a*) складається із зерен плагіоклазу, польового шпату і кварцу неправильної форми.

Структура вапняку (рис. 3.1, б) – кристалічно-зерниста зі значною кількістю шарових і еліпсоїдальних оолітів – кристалічно-зерниста.

Структура глини (рис. 3.1, в) – плямиста, лусковидна з домішками незначної кількості органічних сполук.

Серед структур природних матеріалів розрізняють структури з базальною, поровою і контактною цементациями

За базальної цементації крупні зерна не утворюють взаємних контактів, вони наче занурені в цементувальну речовину (рис. 3.1, а).

За порової цементації існує щільний каркас, у якому зерна створюють моноліт (рис. 3.1 б). Потім, у разі збільшення кількості крупних зерен у матеріалі утворюється структура з контактною цементацияю (рис. 3.1 в).

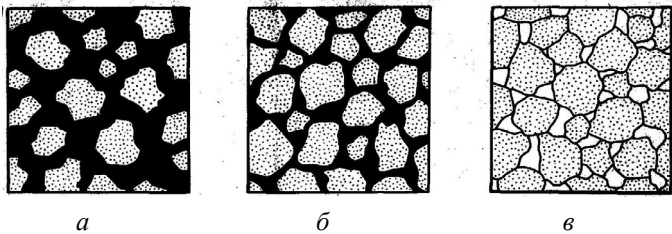


Рис. 3.2. Структура природних матеріалів: а – базальна; б – порова; в – контактна

За крупністю зерен природні кам'яні матеріали бувають крупно-, середньо- і дрібнокристалічної структури. Зі зменшенням крупності зерен суттєво змінюються фізико-механічні властивості матеріалів. Це пов'язано з тим, що зі зменшенням розміру зерен змінюються й характеристики матеріалу (однорідність та неоднорідність) і, як наслідок – його внутрішньо-напружений стан. Тобто, чим менша крупність зерен мінерального матеріалу, тим вища його міцність.

3.2. Структуроутворення дорожньо-будівельних матеріалів

Дорожньо-будівельні матеріали – це рідкі та тверді тіла, структура та внутрішній стан яких характеризують схожість і впорядковане розміщення складових часток – атомів і молекул.

Властивості дорожньо-будівельних матеріалів – дисперсних і дисперсних композиційних систем залежать від їх структури, яка утворюється в результаті об'єднання окремих складових компонентів атомів і молекул відповідним чином. Структуру дисперсних і композиційних матеріалів систем визначають на трьох рівнях:

- макроструктури – будова матеріалу, яку видно неозброєним оком;
- мікроструктури – будова матеріалу, яку видно у мікроскоп;
- внутрішньої будови, яку вивчають на молекулярному рівні фізико-хімічними методами дослідження (електронна мікроскопія, термографія, рентгеноструктурний аналіз, інфрачервона спектроскопія та ін.).

Макроструктура дорожньо-будівельних матеріалів буває таких видів:

- конгломератна;
- ячеїста;
- дрібнопориста;
- пухкозерниста.

Конгломератна структура утворюється за ущільнення в'язучих і полідисперсних заповнювачів, наприклад, упродовж приготування асфальтових бетонів, цементних бетонів та інших щільних сумішей.

Ячеїста структура характеризується наявністю макропор, які утворюються у разі використання в бетонах спінювальних речовин або спіненого бітуму. Прикладами матеріалів ячеїстої структури є пінобетони, пористі асфальтобетони тощо.

Дрібнопориста структура характерна для матеріалів, які утворюються після вигорання органічних домішок.

Пухкозерниста структура характерна для піску, гравію, щебеню, золи-виносу, шлаку.

Мікроструктура дорожньо-будівельних матеріалів може бути 2-х видів:

- 1) кристалічна;
- 2) аморфна.

Для твердих матеріалів звичайним і стійким станом є кристалічний. Особливостями кристалічного стану є такі визначені показники:

- геометрична форма кристалів;
- температура плавлення (рис. 3.3);
- температура кристалізації.

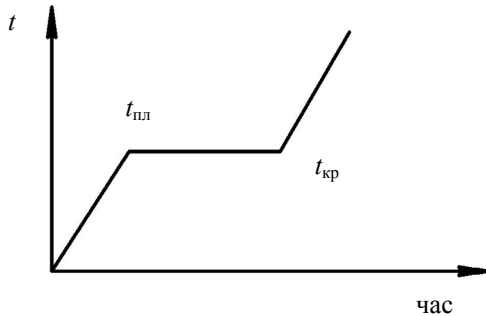


Рис. 3.3. Лінія температури плавлення

Кристали характеризуються впорядкованим розташуванням часток у чітко визначених точках простору, що утворюють кристалічну решітку, яка характеризується періодичною повторюваністю у трьох вимірах. Точки, у яких знаходяться частки, що входять до складу кристалу, називають *вузлами кристалічної решітки*.

3.3. Міцність дорожньо-будівельних матеріалів

Міцність дорожньо-будівельних матеріалів буває теоретичною чи реальною.

Теоретична міцність характеризується напругою, необхідною для розділення двох сусідніх шарів атомів.

Теоретичну міцність $\sigma_{\text{теор}}$ отримують, виходячи з умови, що в момент руйнування матеріалу вся енергія пружної деформації, накопичена в об'ємі двох шарів атомів, переходить у поверхневу енергію двох знов утворених упродовж руйнування поверхонь.

Теоретичну міцність визначають за рівнянням Орована-Келлі:

$$\sigma_{\text{теор}} = \sqrt{\frac{E\mathcal{E}}{a}}, \quad (3.1)$$

де E – модуль пружності, МПа; \mathcal{E} – поверхнева енергія твердого тіла на 1 см^2 , Дж; a – міжатомна відстань (середньо $2 \cdot 10^{-8} \text{ см}$).

Теоретична міцність матеріалу прямо пропорційно залежить від модуля пружності та поверхневої енергії матеріалу.

Наприклад,

Σ теор для сталі 30 000 МПа.

Практична міцність сталі приблизно 1000 МПа.

Σ теор для скла 14 000 МПа.

Практична міцність скла приблизно 1000 МПа.

У роботі дорожньо-будівельних матеріалів у дорожніх конструкціях використовують тільки незначну частку їх теоретичної міцності внаслідок наявності пор, тріщин і дефектів у шарах дорожнього одягу. Початок майбутнього руйнування будь-якого матеріалу – це порушення цілісності структури у вигляді мікротріщин.

Дорожньо-будівельні матеріали, як природні, так і штучні, складаються з багатьох дуже дрібних зерен – окремих кристалів.

Ці кристали можуть безпосередньо зростатися між собою в процесі свого виникнення або бути зв'язаними наче зклеєними наявністю іншої кристалічної речовини.

Між такими дрібними зернами можуть залишатися пори різних розмірів, які відкриті у вигляді каналів або замкнені у вигляді площин – пухирів.

Це зумовлює наявність матеріалів з різними структурами, а відповідно й різною міцністю та фізико-механічними властивостями.

Усі кристалічні матеріали мають більшу або меншу кількість точкових дефектів, так звані «дислокації».

Дислокація – це одномірний лінійний дефект кристалічної решітки, який виникає в процесі утворення кристалу, або в результаті подальших механічних, теплових та інших впливів.

Дислокація буває таких видів: крайова, гвинтова та змішана (криволінійна). Найчастіше зустрічається крайова дислокація.

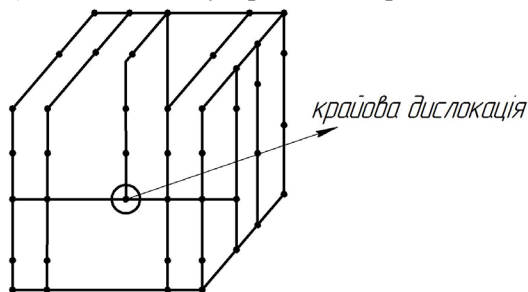


Рис. 3.4. Крайова дислокація

У крайовій дислокації (рис. 3.4) відхилення від ідеальної будови кристалу викликане тим, що один шар атомів з певної причини виявився незалежним. Для зсуву в матеріалі на одну міжатомну відстань (крок) необхідно докласти зовнішнє зусилля, значно менше за теоретичну міцність даного кристалу. Продовжуючи навантажувати кристал, можна зсувати дислокацію до краю кристалу (до грані).

Утворення крайової дислокації залежить від того, чи легко міжатомний зв'язок може бути зруйнований і знову відновлений, тому щоразу, коли дислокація переміщується на один крок – міжатомну відстань – повинні розриватися старі зв'язки та встановлюватися нові.

Якщо присутні всі види дислокацій, вони переплітаються мов сплутані нитки, гальмуючи переміщення одна одної, і в результаті зміцнюються. У зв'язку з цим у разі подальшого механічного впливу (руйнування) матеріал може стати крихким.

Реальна (механічна) міцність кристалічних тіл значно менша за міцність ідеального кристалу того ж складу та будови, але без дефектів структури.

Тому теоретично завжди з одієї і тієї ж речовини можна отримати набагато більш тверде тіло, якщо наблизити його структуру до ідеальної, розробивши засіб усунення найбільш небезпечних дефектів структури.

Структуру та властивості композиційних матеріалів можна вдосконалювати, застосовуючи фізико-хімічні засоби, механічні та термічні впливи із самого початку їх виготовлення. Наприклад, оптимізуючи процес змішування компонентів під час приготування асфальтового бетону.

Чим менші розміри зерен, наприклад, кристалів внаслідок зростання яких утворюється тверде тіло, тим вища міцність цих кристалів, а відповідно й усього тіла, тим менша ймовірність наявності в зерні небезпечного дефекту, який під дією зовнішніх сил, тобто тих, що виникають у разі напруженості, зумовлює початок руйнування.

Особливо стрімко зростає міцність тіла, майже наближаючись до ідеальної межі, внаслідок переходу до розмірів зерен, близьких до середніх відстаней між небезпечними дефектами.

Тобто найбільш високоміцні матеріали – це дрібнозернисті суміші дорожньо-будівельних матеріалів.

3.4 Фізико-хімічна взаємодія між компонентами в дорожньо-будівельних матеріалах

У дорожньо-будівельних матеріалах (сумішах), а також окремих матеріалах, що використовують для улаштування дорожнього одягу, відбуваються складні фізико-хімічні процеси, основними з яких є:

- адсорбція фізична та хімічна;
- адгезія (прилипання);
- когезія (злипання).

Адсорбцією називають згущення (концентрування) газоподібної або розчиненої речовин на поверхні розділу фаз. Газ або розчинену речовину називають у цьому випадку *адсорбтивом*, а рідину або тверде тіло, яке їх адсорбувало – *адсорбентом*.

Розрізняють фізичну, або ж вандервальсову, адсорбцію і хімічну адсорбцію, або ж хемосорбцію.

За фізичної адсорбції адсорбційні сили мають таку ж природу, що й міжмолекулярні, або вандервальсові, сили. Фізична адсорбція завжди зворотна.

За хімічної адсорбції адсорбційні сили мають хімічну природу. Це явище виникає якщо фази бітум-мінерального матеріалу утворюють хімічні сполуки та з'єднання (суміші). Хемосорбція, зазвичай, незворотна.

Теплота фізичної адсорбції складає 2–8 ккал*моль⁻¹.

Теплота фізичної адсорбції може сягати 200 ккал*моль⁻¹, тобто вона є порівнянною з теплою хімічної реакції.

За хімічної адсорбції молекули адсорбтива, зв'язані з адсорбентом міцними хімічними силами, природні, не можуть переміщуватися поверхнею останнього. За фізичної адсорбції молекули адсорбтиву, або здатні переміщуватися поверхнею адсорбента, або не здатні. Це відбувається тому, що поверхня адсорбенту складається з різних атомів, іонів або молекул, які по-різному взаємодіють з молекулами адсорбтиву.

Зі зростанням температури хімічна адсорбція збільшується внаслідок зростання кінетичної енергії молекул і їх здатності подолати потенційний бар'єр.

Десорбція виникає внаслідок розкладання хемосорбційної сполуки, що утворилась на поверхні в результаті з'єднання. Хемосорбційні процеси відповідають за міцність прилипання (ад-

гезії) бітуму до поверхні мінеральних часток. Хемосорбційні процеси спостерігаються під час об'єднання мінеральних матеріалів (карбонатних і основних гірських порід) з активними бітумами, у складі яких достатня кількість поверхнево-активних речовин кислого характеру (асфальтогенові кислоти), здатних утворювати в зоні контакту бітуму з мінеральними матеріалами нові хімічні сполуки. Оскільки ці з'єднання нерозчинні у воді, бітумні шари, що утворились на поверхні мінеральних часток, виявляють стійкість за наявності води.

Фізична адсорбція перебігає самоповільно. Адсорбтив намагається заповнити всю поверхню адсорбента, але цьому перешкоджає процес, протилежний адсорбції – десорбція, викликана прагненням до рівномірного розподілу речовини внаслідок теплового руху. Для кожної концентрації адсорбтиву, у навколишньому середовищі, існує стан адсорбційної рівноваги, аналогічний до рівноваги між конденсацією і випарюванням. Чим вища концентрація адсорбтиву, тим більша адсорбція, чим вища температура, тим менша фізична адсорбція, оскільки згідно з принципами Ле Шательє-Брауна, десорбція як процес, зворотний щодо адсорбції, супроводжується поглинанням тепла.

Величину адсорбції Γ (моль*см⁻²) визначають як надлишок маси даного (адсорбованого) компонента, що припадає на одиницю площі поверхневого шару

$$\Gamma = \frac{M - (m_1 + m_2)}{S_{1,2}}, \quad (3.2)$$

де M – маса даного компонента в системі; m_1 і m_2 – маси компонента в об'ємі кожної; $S_{1,2}$ – площі поверхневого шару.

Адгезія (прилипання) – це взаємодія певної міцності між поверхнями контакту різної природи завдяки дії фізичних або хімічних міжмолекулярних сил.

Поняття адгезії, змочування і розтікання відносять до міжфазної взаємодії, які спостерігають між матеріалами. Розрізняють адгезію між двома рідинами, між рідиною і твердим тілом і між двома твердими тілами. Очевидно, що змочування і розтікання зумовлюють наявність хоча б однієї з фаз в рідкому стані та зумовлені адгезійною взаємодією. У той самий час адгезії між двома твердими тілами майже завжди сприяє попередній перехід хоча б

однієї з фаз у рідкий стан для збільшення інтенсивності молекулярно-кінетичного руху та здійснення необхідного контакту. Тому, зазвичай, адгезія та змочування супроводжують одне одне і відповідним чином характеризують міжфазну взаємодію.

Процес утворення адгезійного зв'язку зазвичай поділяють на дві стадії. На першій, так званій «транспортній», відбувається переміщення молекул адгезиву (клейкої в'язкої рідини) до поверхні субстрата (тіло, на яке наносять адгезив) і їх певну орієнтованість у міжфазному шарі, у результаті чого забезпечується тісний контакт між молекулами і функціональними групами молекул адгезиву та субстрату. Перебігу першої стадії процесу адгезії сприяє зростання температури і тиску, а також перехід однієї з фаз (зазвичай адгезиву) у рідкий стан унаслідок розчинення або плавлення. Тіснішого контакту між адгезивом і субстратом досягають після ретельного очищення поверхонь, які контактують.

Другу стадію адгезії визначають у безпосередній взаємодії адгезиву та субстрату, яка може бути зумовлена різними силами – від вандервальсових до хімічних. Сили ковалентних зв'язків починають діяти на відстанях між атомами та молекулами, які не перевищують 0,5 нм. Дія іонних і вандервальсових сил виявляється на дальших відстанях – приблизно від 1 до 100 нм. Міжмолекулярною взаємодією контактуючих фаз завершується процес адгезії, що відповідає мінімальній міжфазній (поверхневій) енергії. За склеювання твердих тіл на цій стадії відбувається затвердіння адгезиву. Процес затвердіння найбільш важко підлягає кількісному опису.

Постадійний розгляд процесу адгезії дозволяє зробити висновок, що максимально можлива адгезія може бути тільки між двома рідинами, або рідиною і твердим тілом, оскільки це забезпечує повний контакт між поверхнями. Максимальної адгезії твердих тіл практично досягти неможливо внаслідок нерівностей їх поверхонь, стикання яких відбувається тільки в окремих точках. Розрізняють кілька механізмів (і відповідно теорій) адгезії залежно від природи умов, за яких відбувається адгезія.

Згідно з механічною теорією адгезії, механічна адгезія здійснюється шляхом затікання в пори та тріщини поверхні кожного тіла рідкого адгезиву, який потім твердіє, забезпечуючи механічне зчеплення з твердим тілом. Згідно з молекулярним (адсорбційним) механізмом адгезія відбувається завдяки молекулярним вандерваль-

совим силам і водневим зв'язкам. Для такої адгезії придатне відоме правило схожості рідин за полярністю. Чим ближчі полярності адгезиву та субстрату, тим міцніший контакт між ними.

Електрична теорія адгезії пов'язує виникнення адгезії з утворенням подвійного електричного шару між адгезивом і субстратом. Відшарування, як і розсування обкладинок конденсатора, викликає збільшення різниці електричних потенціалів, що сприяє міцності адгезійного контакту. Дифузійний механізм передбачає взаємне проникнення молекул і атомів у поверхневі шари взаємодіючих фаз. Процес дифузії (проникнення) спричиняє уположення межі розділу фаз, взаємне їх розчинення в місцях контакту.

Хімічна теорія адгезії стверджує, що адгезія виникає внаслідок взаємодії адгезиву та субстрату. Іноді механізм адгезії є змішаним, що пояснюють кілька теорій її виникнення.

Явища адгезії, змочування і розтікання широко розповсюджені в природі, застосовують це у різних галузях промисловості, зокрема в дорожньому та аеродромному будівництві. Склеювання матеріалів, нанесення лакофарбових і тонкошарових неорганічних і органічних покриттів, отримання різних матеріалів на основі в'язких речовин і наповнювачів (бетон, гума, склопластики і т.ін.), зварювання і спаювання матеріалів, фарбування – усі ці процеси пов'язані з адгезією і змочуванням, що значною мірою визначають якість матеріалів і виробів.

Когезія (злипання) означає притягіння між молекулами одного і того самого твердого тіла або рідини, яке веде до об'єднання їх в одне тіло. Когезія зумовлена міжмолекулярними силами взаємодії, водневими або хімічними зв'язками між молекулами, атомами, іонами, що знаходяться в різних фазах.

Сили когезії стрімко зменшуються з відстанню, вони незначні в газах і найзначніші в твердих тілах.

На дію сил когезії впливає температура: зростання якої веде до зниження фізичних сил взаємодії між частками речовини, і когезія зменшується. Особливо це помітно під час нагрівання бітумів. Зі зростанням температури сили зчеплення між частками бітуму слабшають, і когезія зменшується.

3.5. Класифікація дорожньо-будівельних матеріалів

Можна виокремити 7 груп дорожньо-будівельних композиційних матеріалів (рис. 3.5):

- органічні в'язучі – бітуми, дьогті з додаванням модифікувальних домішок – структуроутворювальних, адгезійних, полімерних;
- неорганічні (мінеральні) в'язучі – портландцемент, шлакопортландцемент, сульфатостійкий портландцемент із додаванням пластифікувальних, протиморозних та повітряутягувальних домішок;
- асфальтобетони з додаванням речовин, несумісних термодинамічно, але сумісних технологічно з іншими складовими компонентами суміші, а саме: полімерних смол, сірки, дисперсних волокон, протиожеледних домішок;
- асфальтобетони переривчастої структури (пористі), що утримують у своєму складі частини мінерального матеріалу необроблені в'язучі та частки з плівкою бітуму зменшеної товщини або зовсім без неї;
- асфальтобетони органо-мінеральні – асфальтобетони, що утримують речовину коагуляційної структури (органічна в'язуча речовина) і кристалізаційної структури (мінеральна в'язуча речовина);
- цементобетони армовані дисперсними волокнами, виготовленими з металевих, полімерних та природних матеріалів (скло, базальт);
- мастики та герметики на основі бітумно-полімерних в'язучих речовин з наповнювачами – мінеральними дисперсіями різної природи.

Питання для самоконтролю



1. Що визначає структуру кам'яних матеріалів?
2. На яких трьох рівнях визначають структуру дисперсних і композиційних систем?
3. Що таке ячеїста структура дорожньо-будівельних матеріалів?
4. Як саме визначають реальну міцність дорожньо-будівельних матеріалів?
5. Що таке фізична та хімічна адсорбція?
6. Схарактеризуйте явище адгезії.
7. Які існують 7 груп дорожньо-будівельних композиційних матеріалів?

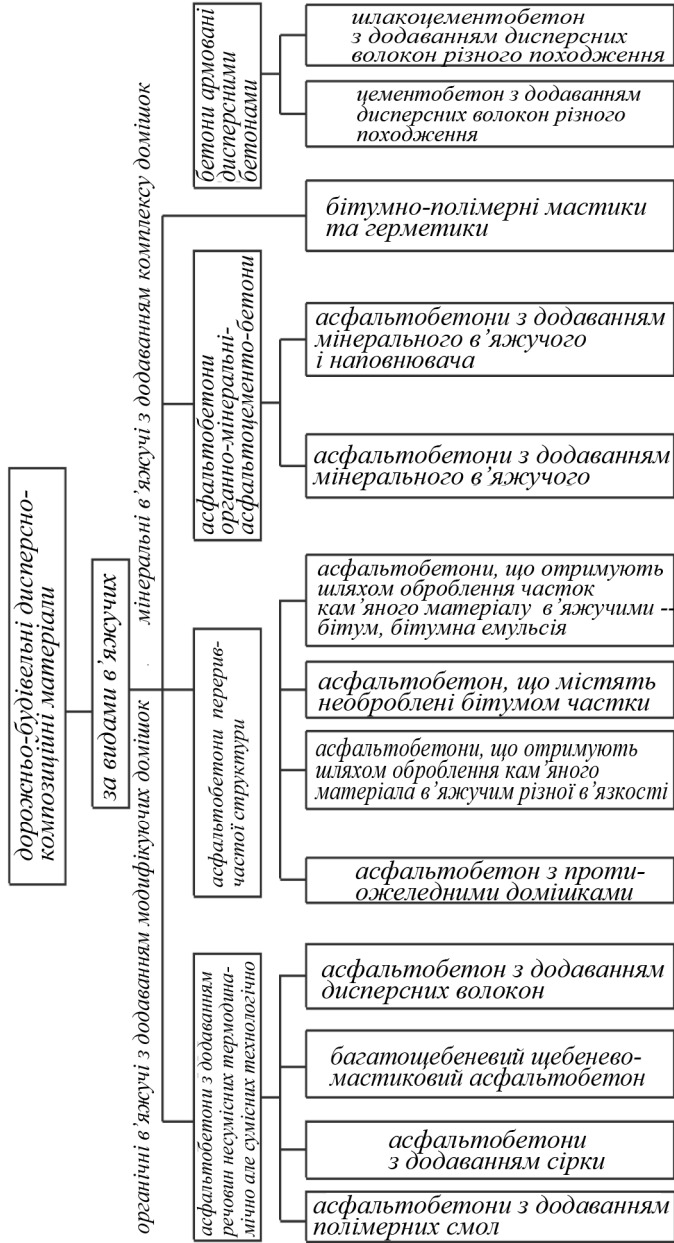


Рис. 3.5. Класифікація дорожньо-будівельних матеріалів

Розділ 4. НЕОРГАНІЧНІ В'ЯЖУЧІ РЕЧОВИНИ. СТРУКТУРА І ВЛАСТИВОСТІ

4.1. Дисперсні системи неорганічних в'язучих

Неорганічні (мінеральні) в'язучі речовини – це порошкоподібні матеріали, які під час змішування з водою або з іншою рідиною (розчинами солей, лугів кислот) утворюють пластичне тісто, що в результаті фізико-хімічних процесів перетворюється на штучний камінь – цемент і його різновиди, вапно та ін.

З позицій фізико-хімічної механіки неорганічні в'язучі речовини являють собою безводні або напівводні сполуки, які взаємодіють із водою (або з розчинами електролітів) з певною швидкістю, утворюючи колоїдні розчини.

Взаємодіючи з водою, вони переходять у дисперсний колоїдний стан, утворюючи перенасичені системи, які трансформуються в пластичне тісто, що з часом твердне і перетворюється на каменеподібне тіло, – твердий штучний камінь відповідної міцності за рахунок структуроутворення.

Міцність і фізико-механічні властивості твердого штучного каменю залежать від міри структуроутворення, яка за заданих технологічних умов отримання забезпечує фазовий склад продуктів гідратації.

Послідовність кристалізації гідратних фаз визначається найбільшою термічною вірогідністю їх утворення і технологічними факторами (температура, тиск, швидкість і тривалість змішування), а також хімічним складом в'язучого матеріалу.

Довговічність твердого штучного каменю визначається мірою нерозчинності та термодинамічною стабільністю сполук, що входять до складу продуктів твердіння.

Природа неорганічних в'язучих речовин є досить складною, її дослідженню присвячено багато праць. Узагальнення сучасних уявлень про механізм прояву фізико-механічних властивостей в'язучих речовин дає можливість визначити особливості їх використання залежно від їх природи.

Сировиною для отримання неорганічних (мінеральних) в'язучих речовин можуть бути природні матеріали кальцієво-

магнієві, карбонатні гірські породи такі, як: крейда, мармур, вапняковий туф, вапняк-ракушняк, доломітизовані вапняки, доломіти, шлакові технічні породи, глина, сланець та ін.

Сировина або сировинна суміш повинні бути такими, щоб отримані неорганічні в'язучі, мали відповідні властивості і відповідали вимогам діючих нормативних документів (табл. 4.1).

Таблиця 4.1

Вимоги до сировини неорганічних в'язучих матеріалів

Неорганічний в'язучий матеріал	Сировинна суміш, яка надходить на обпал	Основні елементи, що входять до хімічного складу цементу
Портландцемент різних властивостей і марок	Вапняк + глина	63-67% CaO
	Вапняк + доменний шлак	21-24 % SiO ₂ 4-7 % Al ₂ O ₃
	Вапняк + різні золи	2-4 % Fe ₂ O ₃
Глиноземистий цемент	Вапняк + боксит	35-45 % CaO 5-10 % SiO ₂
	Вапно + боксит	4-7 % Al ₂ O ₃ 2-4 % Fe ₂ O ₃

Використання кількох порід (сировинної суміші) для отримання неорганічних в'язучих речовин, зокрема портландцементу, викликане необхідністю коригування хімічного складу головних вихідних сировинних компонентів для досягнення проектного хімічного складу.

Окрім того, для виготовлення портландцементу використовують різні мінеральні домішки, що коригують його склад – мінералізатори – плавиковий шпат Ca₂F₂, кремнефтористий магній MgSiF, хлористий кальцій CaCl₂, сірчаноокислий кальцій CaSO₄*H₂O, які додають у кількості 0,5–1 % від маси суміші.

Міцність цементного каменю визначає співвідношення кількості дисперсної і кристалічної фаз, довжиною і діаметром кристалів, їх міцністю і міцністю всієї решітки (каркасу).

Процес синтезу міцності цементного каменю в дисперсних системах відбувається в два етапи. На першому етапі утворюється каркас кристалічної структури та виникають контакти зрощення між кристалами новоутворень. На другому етапі нових контактів не утворюється, а відбувається зміцнення вже утвореного каркасу.

Використання неорганічних в'язучих матеріалів відомо ще з глибокої давнини. Однією зі споруд, побудованих з використанням неорганічного в'язучого – вапна, є споруда Беспорського царства, зведена в V–IV ст. до н.е. Для побудови Єгипетських пірамід більш як 3700 р. до н.е. застосовували повітряне вапно та гіпс. У XIX ст. почалось широке заводське виготовлення портландцементу.

4.2. Класифікація неорганічних в'язучих речовин

Неорганічних в'язучих речовин існує значна кількість, але в дорожній і аеродромній галузях використовують цементи з різної сировини та вапно, тому в пропонованій класифікації значної уваги надають саме цим матеріалам.

Згідно з ДСТУ Б В.2.7-91-99, що діє в Україні, неорганічні (мінеральні) в'язучі речовини, за складом можуть бути як моно- так і полікомпонентними. Їх можна поділити на групи згідно з фізико-механічними властивостями (міцність на стиск, строки тужавіння, швидкість твердіння та ін.), класи, які визначають за умовами та механізмами твердіння, і види, пов'язані з хімічною природою сполук під час реакції (лужноземельні, магнезіальні, лужні та ін.).

За напрямками використання неорганічні в'язучі речовини поділяють на: гідравлічні, повітряні, кислотоупорні (кислотостійкі) і автоклавного твердіння.

Кожну з цих груп своєю чергою поділяють на кілька різновидів відповідно до складу та властивостей.

Гідравлічні в'язучі речовини (цементи) здатні впродовж затвердження водою, після попереднього твердіння на повітрі, продовжувати твердіти у воді, зберігаючи та збільшуючи свою міцність. За складом мішки поділяють на: цементи на основі портландцементного клінкеру (портландцемент, портландцемент із мінеральними домішками, шлакопортландцемент, пуцолановий портландцемент), цементи на основі глиноземистого клінкеру (глино-емистий, високоглиноземистий і гіпсоглиноземистий) і гідравлічне вапно.

Повітряні в'язучі речовини у разі затвердження водою тужавіють, тверднуть і перетворюються на камінь тільки на повітрі. Камінь, який утворився, ще довго зберігає міцність, але теж тільки в повітряному середовищі. Такі матеріали використовують тільки в

надземних спорудах, стійких до дії води. До цієї групи відносять: повітряне вапно, гіпсові та магнезіальні в'язучі речовини.

Кислототривні (кислотостійкі) в'язучі речовини після твердіння на повітрі можуть довгий час зберігати міцність у разі дії на них мінеральних кислот. Їх використовують, якщо твердий матеріал працює в кислотному середовищі. До цієї групи належать: кислотостійкий цемент, кварцевий, кремнієфтористий цемент.

В'язучі речовини автоклавного твердіння перетворюються на камінь тільки за автоклавного (гідротермального) оброблення за тиску насиченого пару 0,9-1,3 МПа і температури 170-210 °С. До цієї групи відносять вапняково-кремнеземисті, вапняково-шлакові та вапняково-золяні речовини.

За фізико-механічними властивостями неорганічні в'язучі класифікують за: строками тужавіння, швидкістю і механізмом твердіння та міцністю на стиск.

Строки тужавіння визначають період, протягом якого суміш неорганічної в'язучої речовини з водою зберігає свою пластичність. Найбільш швидко тужавіють гіпсові в'язучі речовини – початок тужавіння 4–5 хвилин, кінець через 10–15 хвилин після затворення водою. Дуже повільно тужавіє гідратне вапно – через 3–5 діб.

Гідралічні в'язучі речовини (цементи) за строком тужавіння поділяють на повільно тужавіючі (початок більш як за 1 год 30 хв після приготування), нормально тужавіючі (початок тужавіння від 45 хв до 1 год 30 хв) і швидкотужавіючі (початок тужавіння менш як за 45 хв).

Швидкість твердіння визначається інтенсивністю реакцій взаємодії неорганічної в'язучої речовини з водою.

Цементи за швидкістю твердіння поділяють на:

- звичайні (з нормуванням міцності у віці 28 діб);
- швидкотвердні (з нормуванням міцності у віці 1 і 28 діб);
- надшвидкотвердні (з нормуванням міцності у віці 1 доба чи менше).

Для гіпсових в'язучих речовин твердіння складає 1-2 години. Твердіння негашеного вапна може відбуватися кілька років.

За механізмом твердіння неорганічні в'язучі речовини поділяють на гідратаційно-конденсаційні, контактено-конденсаційні, коагуляційні та поліконденсаційні.

Гідратаційно-конденсаційний механізм твердіння пов'язаний зі змінами складу неорганічно в'язучої речовини в процесі гідратації, що веде до формування каменеподібного тіла. За цим механізмом тверднуть гідравлічні повітряні та автоклавного твердіння в'язучі речовини, тобто портландцемент, вапно і вапняково-шлакові неорганічні в'язучі речовини.

Контактно-конденсаційний механізм твердіння виявляється за виникнення контактів у результаті фізичних поверхневих явищ між макрочастками речовини (аморфної або нестабільної кристалічної структури) без змін її хімічного складу, з утворенням у результаті каменеподібного тіла. Цей механізм твердіння характерний для силікатних та алюмосилікатних відходів різних виробництв.

Коагуляційний механізм твердіння відбувається за рахунок формування висококонцентрованого колоїду, за умови видалення з нього вільної води, з утворенням каменеподібного матеріалу. Характерними представниками цього класу в'язучих є глини.

Поліконденсаційний механізм твердіння виникає внаслідок охолодження високотемпературного розплаву шляхом синтезу міцного штучного каменю. До таких в'язучих речовин відносять фосфорний і сірчаний цементи.

Міцність на стиск характеризує здатність неорганічної в'язучої речовини після твердіння сприймати без руйнування стиск, розтяг чи інше зовнішнє навантаження. Чим більша міцність штучного каменю і чим швидше він набирає воду, тим вища якість в'язучої речовини. Окрім того, міцність штучного каменю залежить від: виду в'язучої речовини, міри її подрібнення, водопотреби, умов і швидкості твердіння. Міцність цементів оцінюють за маркою, числове значення якої визначає міцність на стиск стандартних зразків у віці 28 діб. Одиницею вимірювання є МПа або кН.

За міцністю на стиск цементи бувають:

- високоміцні (М 550, 600 і вище) – високомарочні;
- підвищеної міцності (М 500) – високомарочні;
- звичайні (М 300, 400) – марочні;
- зниженої міцності (нижча за М 300) – низькомарочні.

Міцність на стиск повітряних в'язучих речовин значно нижча (5–20 МПа).

Класифікація неорганічних в'язучих речовин, за К. К. Пушкарьовою, наведена на рис. 4.1.

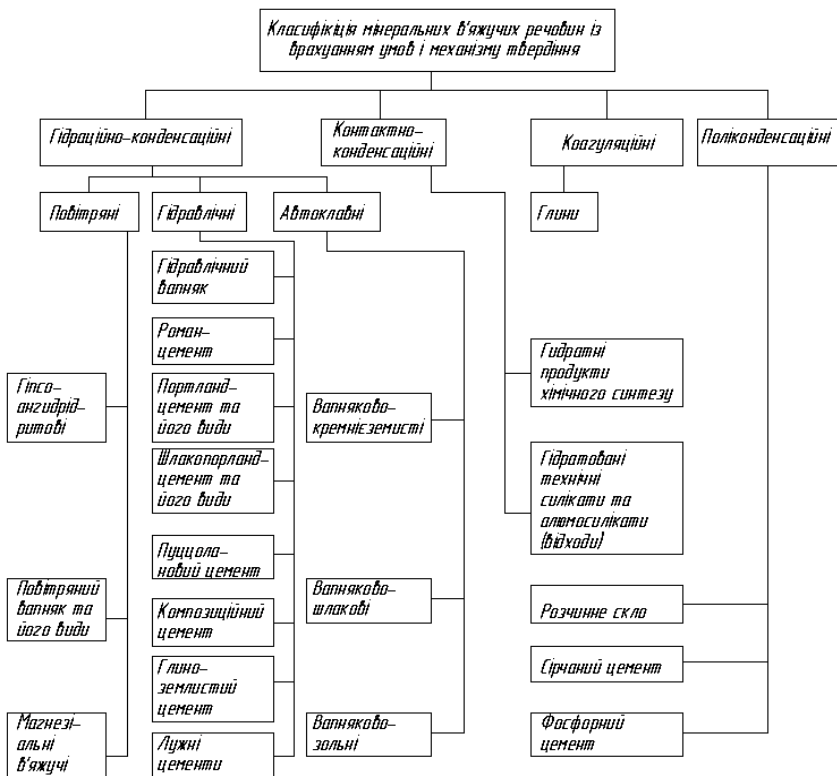


Рис. 4.1. Класифікація неорганічних в'язучих речовин

4.3. Будівельне повітряне вапно

Будівельне повітряне вапно (ДСТУ Б В.2.7-90-99) – це продукт, отриманий у результаті обпалу за температури 1100–1200 °С, нижчої за температуру спікання кальцієво-магнієвих, карбонатних гірських порід (вапняку, крейди тощо), які складаються, головним чином, з оксиду кальцію і містять не більш як 6 % глинистих домішок.

Будівельне повітряне вапно є удобоукладальним, пластичним матеріалом, що пов'язано з його високою водоутримувальною здатністю. Активність будівельного повітряного вапна визначають за кількістю у складі оксидів кальцію і магнію. Чим вища активність,

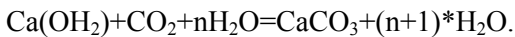
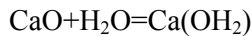
тим кращі в'язкі властивості та менші витрати на приготування сумішей.

Розрізняють кілька видів будівельного повітряного вапна:

– негашене комове вапно – «кипелка», яке складається з CaO (до 90 %). Питома щільність 3,1–3,3 г/см³, насипна щільність 1600–2600 кг/м³, активність 70–90 % без домішок і 55–65 % з домішками, міцність – 0,5–0,6 МПа. Використовують для укріплення ґрунтів, особливо перезволожених;

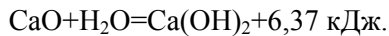
– негашене мелене вапно – порошкоподібний продукт мелення комового вапна, складається з CaO (бл. 90 %). Питома щільність 3,2–3,4 г/см³, насипна щільність: у пухкому стані 900–1100 кг/м³, в ущільненому стані 1100–1300 кг/м³, активність 85–95 % (без домішок у свіжоподрібненому стані) і з домішками 55–65 %, міцність 0,5–0,8 МПа. Використовують для укріплення ґрунтів усіх типів;

– гідратне вапно-пушонка (гашене вапно) – тонкомелений порошок, що отримують у результаті гашення комового вапна з певною кількістю води, складається з Ca(OH)₂ (бл. 90 %). Процес гашення вапна зумовлений процесами кристалізації гідроксиду кальцію Ca(OH)₂ за висихання вапнякового розчину (гідратне твердіння) і подальшої його карбонізації (карбонатне твердіння) згідно з реакцією:



Утворений карбонат кальцію, що зрощується з кристалами Ca(OH)₂ і укріплює вапняковий розчин, збільшуючи його міцність і водостійкість.

Гашене вапно утворюється згідно з реакцією:



Питома щільність у кристалічному стані Ca(OH)₂ – 2,23–2,25 г/см³, насипна щільність 400–500 кг/м³, активність 60–70 % без домішок і 40–50 % з домішками, міцність 0,5–1,0 МПа. Гашене вапно значно ширше використовують у дорожньому й аеродромному будівництвах ніж негашене. Напрямки застосування:

- укріплення слабких ґрунтів;
- отримання різних будівельних розчинів, що повільно тверднуть у суміші з дрібними заповнювачами (піском, відсіванням);

– виготовлення сумішей гідравлічних в'язучих – вапняково-шлакових, вапняково-пуцоланових цементів.

За значного додавання води для гашення вапна (200–250 % від маси вапна) утворюється вапнякове тісто – тістоподібний продукт, що складається з $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

У готовому вапняковому тісті вміст води складає 50 % від маси вапна. На основі вапнякового тіста готують будівельні розчини. У разі подальшого збільшення кількості води утворюється вапнякове молоко, у якому $\text{Ca}(\text{OH})_2$ знаходиться у розчиненому стані.

На основі будівельного повітряного вапна можна отримувати розчини та бетони, які характеризує висока міцність, значення якої залежить від умов твердіння.

Так, за температури 10–20 °С розчини на основі гашеного вапна тверднуть дуже повільно і через 30 днів мають міцність 0,5–1,5 МПа. Твердіння розчинів з негашеного вапна в повітряних умовах за 28 діб дозволяє отримати штучний камінь міцністю 2–3 МПа. Автоклавне твердіння щільних вапняково-піщаних бетонів (тиск пари 0,8–1,0 МПа, температура 180–190 °С) дозволяє отримати штучний камінь міцністю 30–40 МПа, водостійкий і довговічний. За нормальних температурних умов взаємодії вапна та піску не відбувається, а за підвищених тиску та температури взаємодія відбувається, причому досить інтенсивно. Міцність штучного каменю з гашеного вапна забезпечують хімічною взаємодією компонентів сировинної суміші вапна та кварцового піску за реакцією:



За автоклавного оброблення вапняково-кремнеземистих композицій відбувається їх гідросилікатне твердіння, яке використовують у виготовленні силікатних бетонів.

За збільшення кількості вапна щільність і міцність силікатного бетону зростають, але за значної кількості частина його після гідротермального оброблення лишається незв'язною, і якість бетону зменшується.

За використання розчинів і бетонів, отриманих із будівельного повітряного вапна в дорожній і аеродромній галузях необхідно враховувати, що впродовж їх твердіння мають місце деформації, які можуть бути пов'язані зі змінами вологості (усадка, набухання) і з перебігом реакцій гідратації часток, що спеклися. Це пов'язано з

нерівномірністю змін обсягу, який практично неможливо контролювати, і може призвести до виникнення напруг, що сягають критичних значень і надалі, призведуть до розтріскування виробів. Необхідно враховувати також, що в процесі твердіння на повітрі вапнякові розчини та бетони на основі гашеного вапна дають значну усадку.

Найбільш розповсюдженими матеріалами на основі будівельного повітряного вапна в дорожньому й аеродромному будівництві є вапняково-шлаковий і вапняково-зольний цемент.

Вапняково-шлаковий цемент (ДСТУ Б В.2.7–22–95) відносять до композиційних низькоактивних безклінкерних в'язучих речовин. Такий цемент випускають марок М500, М250, М200, М150, М100. Для регулювання строків тужавіння і покращення його властивостей, упродовж виробництва, вводять бл. 5 % гіпсового каменю. Вапняково-шлаковий цемент характеризує інтенсивний набір міцності за підвищених температур, вироби на його основі мають низьку морозостійкість і високу стійкість до дії агресивних середовищ.

Вапняково-зольний цемент відносять до безклінкерних зольних в'язучих речовин. Марки вапняково-зольного цементу М200, М150, М100, М50. Його отримують сумісним подрібненням або ретельним змішуванням окремо подрібнених золи та вапна. Оптимальний вміст вапна – 10–40 %. Зростання температури та часу гідротермального оброблення, а також збільшення питомої поверхні золи підвищує активність таких в'язучих речовин.

Вапнякові розчини та бетони повітростійкі матеріали. За витримування в нормальних умовах вони зміцнюються, у результаті поступової карбонізації гідроксиду кальцію вуглекислим газом повітря. У вологому середовищі під дією змінних температур поступово зменшують міцність і руйнуються.

4.4. Магnezіальні в'язучі

Магnezіальні в'язучі речовини – каустичний магнезит і каустичний доломіт – повітряні в'язучі, отримані з природних магнезиту ($MgCO_3$) і доломіту ($CaCO_3 MgCO_3$) шляхом їх обпалу і подальшого подрібнення.

Під час обпалу магнезиту за температури 800–1000 °С відбувається розкладання $MgCO_3$ на оксиди



Підвищення температури до 1500–1600 °С веде до збільшення кількості кристалів, перекристалізації, зменшення активності MgO і швидкої гідратації. Це спричиняє зниження в'язучих властивостей магнезиту.

Обпал доломіту здійснюють в інтервалі температур 750–850 °С, воно відбувається до повного розкладання MgCO₃, без розкладання CaCO₃.

Спочатку утворюється каустичний магнезит, що складається з MgO і CaCO₃.



а потім $\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$.

Залежно від температури обпалу доломіту можливо отримати такі матеріали:

– за 750 °С – каустичний доломіт, що складається з MgO і CaCO₃;

– за 800–850 °С – доломітовий цемент, що складається з MgO CaO і CaCO₃;

– за 900–1000 °С – доломітове вапно – MgO, CaO

Магнезіальні в'язучі речовини затворюють водним розчином хлориду магнезію MgCl₂*6H₂O (питома щільність 1,08–1,25 г/см³) або інших магнезіальних солей, наприклад, сульфату магнезію MgSO₄*7H₂O (питома щільність 1,10–1,15 г/см³).

Магнезіальні в'язучі характеризує висока міцність на стиск – 60–100 МПа. У зв'язку з тим, що це повітряні в'язучі їх можна використовувати для твердіння на повітрі з відносною вологістю не більшою як 60 %. Міцність бетонів і розчинів після 1 доби твердіння складає 30–50 %, а після 7 діб – 60–90 % від остаточної. Це корозійно- і морозостійкі неорганічні в'язучі речовини.

4.5. Гідравлічні в'язучі матеріали

Гідравлічне вапно – продукт, який можна отримати обпалом мергелястих вапняків, які утримують 6–20 % домішок – глинистих або піщаних. За даними К. К. Пушкарьової, головною характеристикою сировини для отримання гідравлічного вапна є гідравлічний модуль (М), який знаходиться в межах 1,7–9.

$$M = \frac{CaO}{(SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3)}. \quad (4.1)$$

Чим вище значення модуля, тим гірші гідравлічні властивості продукту обпалу, і він за своїми технічними характеристиками наближається до повітряного вапна.

Під час обпалу гідравлічного вапна відбуваються два різні процеси: дисоціація карбонатної речовини каменю до отримання повітряного вапна CaO; дисоціація глинистих речовин – кристалогідратів типу $mAl_2O_3 \cdot nSiO_2$ і утворення нових мінералів – комплексних сполук, а саме $2CaO \cdot SiO_2$, $CaO \cdot Al_2O_3$, $2CaO \cdot Fe_2O_3$. При цьому процесі залишається незв'язною частина CaO, MgO і SiO₂. Обпал гідравлічного вапна здійснюють за температури 900–1100 °С. Питома щільність 2,6–3,0 г/см³, насипна щільність 700–800 кг/м³. Строк тужавіння залежить від кількості вільного CaO.

За будівельними властивостями гідравлічне вапно поділяють на слабогідравлічне та сильногідравлічне. Слабогідравлічне вапно має міцність на стиск на 28 добу твердіння 1,7 МПа, а на згин – 0,4 МПа. Сильногідравлічне вапно має міцність на стиск і згин на 28 добу твердіння 5 МПа і 1 МПа відповідно. Слабогідравлічне вапно тужавіє швидше, але твердіє повільніше ніж сильногідравлічне. Початок тужавіння 0,5–2 години, а закінчення – за 8–16 годин.

Гідравлічне вапно використовують для отримання будівельних розчинів підвищеної водостійкості, для виробництва вапняково-пуцоланового цементу, легких і важких бетонів нижчих класів.

Розчини та бетони на гідравлічному вапні характеризує висока довговічність за експлуатації в повітряно-сухих умовах.

Романцемент – виготовляють з вапнякових або магнезіальних мергелів, у яких глинистих домішок утримується бл. 20 %.

Гідравлічний модуль сировини для отримання романцементу знаходиться в межах 1,1–1,8. Обпал сировини здійснюють за температури 800–1000 °С. Оскільки під час обпалу сировини для виготовлення гідравлічного вапна тут відбуваються два самостійні процеси: дисоціація карбонатної частини породи, дисоціація кристалогідратів типу каолінит $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ або інших глинистих речовин – $m Al_2O_3 \cdot n SiO_2 \cdot p H_2O$ і утворення нових мінералів з цих продуктів обпалу.

Раніше романцемент використовували для виготовлення будівельних розчинів і бетонів, що відкривали можливості економії портландцементу. Але сьогодні виробництво романцементу вважають нерентабельним, і цементні заводи виробляють його в незначній кількості.

Портландцемент – гідралічна в'язуча речовина, яку отримують шляхом сумісного подрібнення клінкеру та гіпсу, які тверднуть у воді та на повітрі. У практиці світового будівництва доріг і аеродромів портландцемент є одним з головних матеріалів для виготовлення бетонів, залізобетонів і будівельних розчинів. Світове виготовлення цементу сягає 1,8 млрд. т. на рік.

Портландцементний клінкер отримують обпалом до спікання за температури бл. 1450 °С сировинної суміші визначеного складу. Зовнішньо клінкер являє собою зерна, що спеклись, розміром 10-60 мм. Подрібнений клінкер після затворення водою тужавіє протягом кількох хвилин, що ускладнює виготовлення виробів. Для уповільнення строків тужавіння (до 3–5 годин) до складу портландцементу вводять гіпс у вигляді природного гіпсового каменю, фосфогіпсу та борогіпсу. Вміст гіпсу в цементі М 300 – М500 повинен бути не меншим як 1,0 і не більшим як 3,5 %, а в цементах високомарочних і швидкотвердних – не меншим як 1,5 і не більшим як 4 % від маси цементу.

Якість цементу багато в чому залежить від хіміко-мінералогічного складу портландцементного клінкеру. Хімічний склад характеризує вміст у клінкері різних оксидів.

Головними оксидами портландцементного клінкеру слугують CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 . Мінералогічний склад характеризує кількісні співвідношення мінералів, які утворились у процесі обпалу сировини. Залежно від вмісту того чи іншого оксиду сировину, яку використовують, поділяють на:

- сировину, у якій переважає CaO – карбонатний компонент;
- сировину, у якій переважають алюмосилікати – глинистий компонент.

Карбонатний компонент, що використовують для портландцементного клінкеру – це карбонатні породи (вапняк, крейда, ракушняк, вапняковий туф, мармур) з вмістом не меншим ніж 40–43,5 % CaO і не більшим як 3,2–3,7 % MgO .

Глинистим компонентом є тонкоуламкові гірські породи, які складаються, головним чином, з глинистих мінералів каолінітової, монтморилонітової, алофанової груп і групи гідролітів (ілітів). Використовують також легкосплавні глини, глинистий мергель, глинистий сланець, лес та інші.

Основними складовими портландцементного клінкеру є мінерали: трикальцієвий силікат (аліт) – $3\text{Ca}\cdot\text{SiO}_2$ (скорочений запис C_3S); двокальцієвий силікат (беліт) – бета-модифікація $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (бета- C_2S); трикальцієвий алюмінат – $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A) і алюмоферити кальцію змінного складу від $8\text{CaO}\cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ до $2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ($\text{C}_8\text{A}_3\text{F}\dots\text{C}_2\text{F}$). Найбільш часто до складу клінкеру входить чотирикальцієвий алюмоферит – C_4AF .

Аліт C_3S – найважливіший мінерал портландцементного клінкеру, основний носій його в'язких властивостей. Він зумовлює можливість досягнення високої міцності протягом першої доби твердіння і визначає міцність у 28-добовому віці. Зі збільшенням вмісту аліту в клінкері в інтервалі 40–70 %, міцнісні показники цементу зростають у лінійній залежності.

Беліт C_2S важливу роль відіграє у формуванні міцного цементного каменю за більш тривалого твердіння – до одного року і довше. Він взаємодіє з водою значно повільніше за аліт і в перші строки твердіння має низьку міцність, яка з часом дорівнює міцності аліту за міцнісними показниками.

Трикальцієвий алюмінат C_3A за рахунок відповідного зменшення кількості алюмоферитів кальцію надає цементу швидкотвердних властивостей, що іноді може викликати сульфатну корозію бетону. Чотирикальцієвий алюмоферит C_4AF – ферментна фаза, яка входить до складу клінкерного скла.

Окрім того, до складу портландцементного клінкеру вводять коригувальні домішки, залізовмісні, глиноземисті, кремнеземисті, які доповнюють недостатню кількість того чи іншого оксиду та покращують будівельні властивості портландцементу.

Як залізовмісну домішку, зазвичай, використовують пиритні огарки із сірчаноокислотних заводів, пил доменних печей. Як глиноземисту домішку застосовують багаті глиноземом малозалізисті глини, боксит. Як кремнеземисту домішку використовують кварцеві піски, трепел.

Важливим видом сировини для виробництва портландцементу є побічні продукти та відходи інших галузей промисловості. Багато з них близькі за складом до портландцементного клінкеру, що спрощує технологію і скорочує обсяг робіт у кар'єрах. Найбільш широке розповсюдження отримали доменні й електротермофосфорні шлаки, а також нефеліновий (белітовий) шлам.

Доменні шлаки утворюються після повного розплавлення в домені вихідних компонентів шихти: руди та флюсу у відновлювальному середовищі. Їх вихід складає 40–60 % від маси чавуну.

Електротермофосфорні шлаки отримують упродовж виробництва фосфору з природних фосфоритів методом възгонки, в електропечах, за температури 1450–1550 °С. До складу доменних і електротермофосфорних шлаків входять оксиди CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , Fe_2O_3 і сірчані з'єднання CaS , MnS , FeS .

У складі портландцементних сировинних сумішей шлаки замінюють глину та частково – карбонатний компонент. Оскільки вони не містять CaCO_3 і включають мінерали, близькі за складом до мінералів цементного клінкеру, то обпал шлаковмісної суміші дозволяє знизити витрату палива та збільшити продуктивність печей.

Нефеліновий (белітовий) шлам – відхід комплексної переробки апатито-нефелінових порід на глинозем, соду, поташ. Оскільки цей шлам пройшов часткове термічне оброблення, він складається, головним чином, з двокальцієвого силікату – мінералу, який входить до складу портландцементного клінкеру та здатний до гідравлічного твердіння. Нефеліновий шлам може замінювати у складі портландцементних сировинних сумішей глинистий і частково карбонатний компоненти.

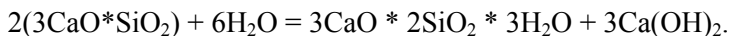
В'язкі властивості цементу залежать від характеру кристалізаційної структури. Найбільшу гідравлічну активність мають портландцементні клінкери із середнім розміром кристалів 20–40 мкм. Регулювання мінералогічного складу і кристалічної структури клінкеру – найважливіший технологічний прийом, який забезпечує отримання цементів із заданими властивостями.

4.6. Основи фізико-хімічної взаємодії портландцементу з водою

Під час затворення портландцементу водою утворюється пластичне тісто, яке поступово твердне та переходить у каменевидний стан.

У процесі твердіння відбуваються складні фізико-хімічні процеси, які є результатом взаємодії портландцементних клінкерних фаз і гіпсу з водою. Кожна фаза портландцементного клінкеру вступає в реакцію гідратації, тобто реакцію, що перебігає з приєднанням води й утворенням нових сполук.

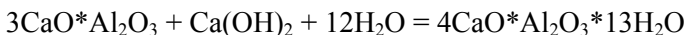
Взаємодія аліту з водою з утворенням гідросилікату кальцію відбувається за такою реакцією:



Беліт взаємодіє з водою в середовищі, насиченому вапном, з утворенням продуктів, аналогічних до продуктів взаємодії аліту.

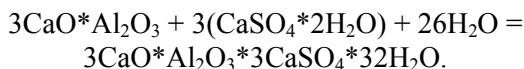


Алюмінат кальцію гідратує з утворенням гідроалюмінату

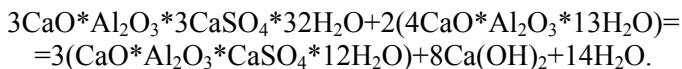


Упродовж гідратації алюмінату кальцію у випадку додавання гіпсу кількістю 3–5 % від маси цементу можливе утворення етрінгіту, що уповільнює процес твердіння цементу до 3–5 годин.

При цьому відбувається реакція



Далі продукти реакції утворення гідроалюмінату та можливого утворення етрінгіту реагують між собою, та синтезується моносольфат кальцію і портландцемент



Склад новоутворень (гідросилікати, гідроалюмінати, гідросольфоалюмінати кальцію і гідроксид кальцію) визначають не тільки за хіміко-мінералогічним складом портландцементу, його водоцементним відношенням, але й умовами твердіння.

4.7. Фізико-хімічні основи твердіння портландцементу

Перетворення цементу на каменеподібне тіло з високою міцністю, що прогресує у часі, – складний багатofакторний процес.

Вперше природу твердіння мінеральних в'язучих речовин пояснив у своїх працях Ле-Шательє. Він пов'язав уявлення про розчинення вихідної в'язучої речовини у воді з утворенням у дисперсній системі перенасичених розчинів і кристалізації з них гідратних сполук, зрощення і переплетіння цих сполук у просторову структуру.

Потім з'явилась теорія В. Міхаеліса, який пояснював утворення нових фаз і затвердіння дисперсій, перебігом адсорбційних топохімічних процесів і поглинанням води із селевої структури негідратованими зернами в'язучої речовини.

О. О. Байков поділив процес твердіння на три важливі стадії: 1 – підготовчу, яка починається з хімічної реакції між цементом і водою, що веде до утворення нових з'єднань і включає розчинення гідратів до насичення розчину; 2 – колоїдизації топохімічної реакції, утворення гідратів колоїдних розмірів; 3 – перекристалізації внаслідок розчинення дрібних часток і виникнення кристалічного зростку.

Пізніше, В. М. Юнг, у результаті тривалих спостережень за процесом утворення мікроструктури в цементних дисперсіях зробив висновок про її неоднорідність і запропонував розглядати структуру цементного каменю як «мікробетон».

При цьому, В. Ф. Журавльов вважав, що в'язучі речовини здатні цеолітно поглинати воду та здійснювати додаткове диспергування зерен по мікротріщинах з виділенням гідратів у вигляді гелю з подальшою перекристалізацією.

С. Д. Окороков звів механізм диспергування цементних зерен до гетерогенного поліформізму, який відбувається в місцях контакту твердої і рідкої фаз.

П. О. Ребіндер також надавав великого значення «адсорбційному» диспергуванню в'язучої речовини по слабких місцях і дефектах до утворення часток колоїдних розмірів.

О. П. Мчедлов-Петросян припускав, що витрата вихідної в'язучої речовини може відбуватися за притягування надлишкових гідроксильних груп (ОН) до активних центрів в'язучої речовини –

місцях зі зниженою координацією катіонів. При цьому відбувається зворотне поглинання води, без зміни структури кристалу.

Однак М. А. Торопов довів, що в кристалічних решітках цементних мінералів не існує площин таких розмірів, які свідчили б про проникнення в них молекул води.

На основі численних спостережень за нарощенням міцності в дисперсіях мономінеральних в'язучих речовин і цементах різного складу П. О. Ребіндер дав таке уточнене пояснення фізико-хімічної сутності процесу твердіння: після перемішування тонкоподрібненої в'язучої речовини з водою утворюється коагуляційна структура, яка визначає початкову консистенцію суміші. В'язуча речовина утворює розчин, перенасиченіший порівняно з гідратом, термодинамічно стійкіший. Потім виникають зародки гідратних новоутворень, відбувається їх зрощення в хаотичну просторову структуру – кристалізаційну структуру твердіння, яка потім ущільнюється і зміцнюється в результаті обростання кристалів. У разі зменшення перенасичень ростуть окремі кристали та обростає сітка.

В. Б. Ратинов детально вивчав кинетику процесів гідратації, дифузійні явища, метастабільність розчинності гідратних фаз. Виходячи з положень термодинаміки, він вважав, що якщо на поверхні часток утворюється плівка гідратних новоутворень (гідратована в'язуча речовина), то розчинність його повинна бути нижчою, ніж негідратована в'язуча речовина.

М. І. Стрелков вважав, що переміщення речовин відбувається в двох напрямках: води – до цементу і продуктів гідратації – у проміжки між зернами. Упродовж взаємодії води з в'язучою речовиною, в результаті хімічної реакції, виникають новоутворення, по всьому контуру часток вихідної речовини. З потовщенням шару контуру виникають внутрішні напруги, які розривають край на дрібніших частках, і вони хаотично переміщуються в об'єм розчину, де розчиняються внаслідок дефектності будови. З перенасиченого розчину формуються вторинні гідрати, які агрегуються в просторовій структурній решітці. Через певний час у місцях контактів відбувається зростання кількості часток.

О. Є. Шейкін показав, що міцність, водонепроникність, усадка та інші властивості цементних розчинів залежать від кількісного співвідношення кристалічних і гелевих мас у структурі каменю.

4.8. Структуроутворення портландцементу

Дані рентгеноструктурного і електроннографічного аналізів, підтверджують положення, що в об'ємі цементного каменю окремо існують два види структуроподібних кристалічних каркасів – гідросилікатний і гідроалюмінатний. Окрім них, тут розподілена значна кількість індивідуальних кристалогідратів і їх агрегатів, які утримуються механічними силами зчеплення. Механізм зрощення структуроподібних каркасів один з одним відбувається таким чином. У вузькому проміжку між кристалами зростає концентрація втягнутого повітря, яке сприяє процесу подальшої кристалізації. Кристалик, що знов утворився на поверхні вже утвореного кристалу, збільшується в напрямку, паралельному до поверхні іншого, досягає і зрощується з ним. Тепло, яке при цьому виділяється, витрачається на поповнення концентрації утягнутого повітря шляхом переходу в розчинений стан частини поверхневих шарів кристалів, що збільшуються. Унаслідок цього заростає проміжок між частками, що наблизилися, і структура стає щільною. Будова кристалічної решітки шву аналогічна до будови решіток кристалів, які зростаються, а його міцність може перевищувати міцність самих кристалів.

Зв'язок між окремими кристалогідратами або їх агрегатами, які відрізняються один від одного за структурою, може здійснюватися адгезійно-когезійними силами, стискальним зусиллям желевидної маси, що висихає, і механічним зчепленням стиснутих часток.

Електронно-мікроскопічні дослідження мікроструктури цементного каменю показали, що в початковий період гідратації цементного клінкеру гідроалюмінати відкладаються на поверхні кристалів пошарово (один шар, другий, третій...).

Нашарування кристалів відбувається практично перед з'єднанням усіх індивідуальних кристалогідратів. Після цього починається відкладання кристалів гідросилікатів у проміжках між кристалами гідроалюмінатів. При цьому, зростає міцність клінкеру та настає спочатку тужавіння, а потім – і затвердіння. Твердий зразок – цементний камінь – має складну агрегатно-рівномірну структуру.

Частина кристалів зв'язується з тонкими адсорбованими плівками води, які поводяться в цьому випадку як квазістатичне тіло, а також з молекулами води, що мають тетраедричну структуру, схо-

жу на структуру гідросилікатів, і слугує щільною перешкодою для іонів, що мігрують.

Міцність цементного каменю обернено пропорційна до товщини цих плівок і залежить від питомої поверхні гідросилікатів, що складає 80 % від усієї поверхні цементного каменю.

І. Г. Гранковський вперше отримав щільні криві кінетики структуроутворення цементно-водних дисперсій протягом 28-ми діб з моменту за творення, визначив чотири стадії процесу формування дисперсної структури цементного каменю, і на основі комплексних фізико-хімічних досліджень, дав їх наукове трактування в першому наближенні.

На рис. 4.2 і 4.3 наведені результати комплексного дослідження процесів структуроутворення і гідrataції. Крива структуроутворення цементного каменю від початку утворення дисперсної структури є інтегральним виявом процесів розчинення, гідrataції і коагуляції, які безперервно відбуваються і накладаються один на одного.

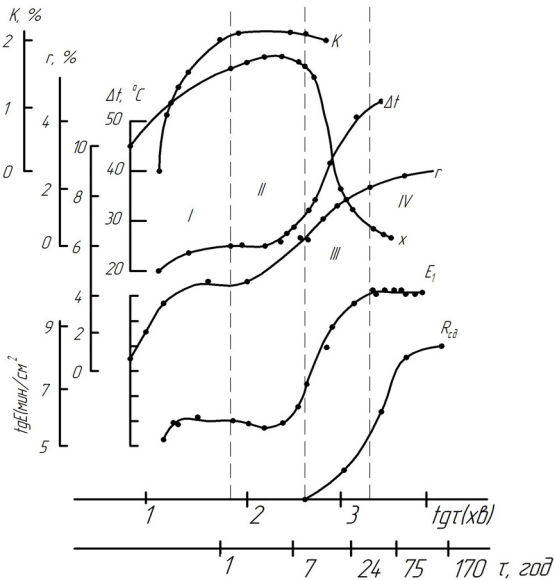


Рис. 4.2. Структуроутворення цементного тіста
 E_1 – повна крива процесу структуроутворення цементного тіста за твердіння за нормальних умов протягом 28-ми діб; $\Delta t, ^{\circ}\text{C}$ – криві тепловиділення, r – зміна рівня гідратності, R_{ct} – межа міцності питомої електропровідності та концентрації K

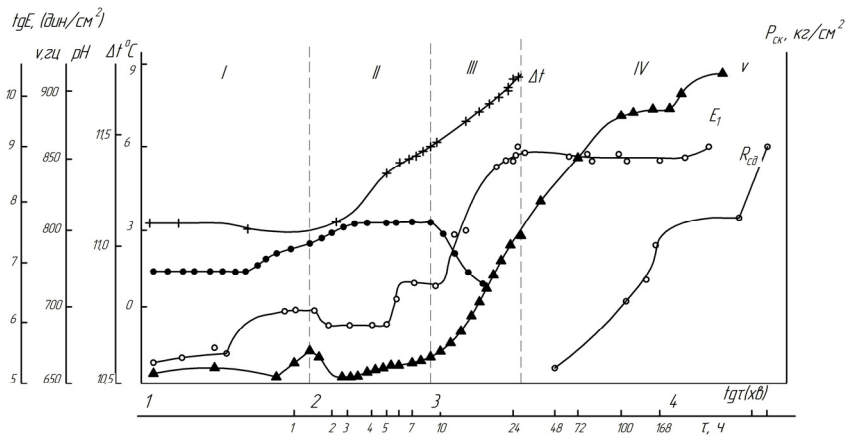


Рис. 4.3. Структурування цементного каменю

E_1 – повна крива кінетики структурування, криві зміни температур Δt , pH, резонансної частоти і межі міцності R_{ct} у процесі формування структури цементного каменю, $v/c=0,5$

Перша стадія – інтенсивна гідратація. За значного рівня гідратації спостерігається максимальна швидкість процесу структурування. Відбувається коагуляція утворених колоїдних часток і створюється просторовий каркас коагуляційної структури, у який входять укрите гідратними новоутвореннями частки клінкеру. Тут відбувається зростання електропровідності і pH, тепловиділення, і найбільше ущільнення системи, що можна виявити з концентрації, яка досягає максимальної величини до кінця першої стадії. Зменшення обсягу (контракція), що притаманне колоїдним системам, відбувається за рахунок орієнтованості структурних елементів води. Контракція відбувається також упродовж утворення просторового каркасу коагуляційної структури – малі частки та структурні елементи просочуються в простір між великими агрегатами структури, унаслідок чого зростає компактність системи. Максимум контракції до кінця першої стадії підтверджує утворення просторової коагуляційної структури.

Друга стадія – розвиток просторової коагуляційної структури. Процеси структурування і гідратації спочатку вповільнені, рівень гідратації незначний, спостерігаються деструктивні явища. У результаті гідролітичного розпаду клінкерних мінералів утворюється значна кількість вільних іонів. Уповільнення розвитку

коагуляційної структури у другій стадії можна пов'язати з утворенням навколо цементних зерен оболонки з продуктів гідратації, які перешкоджають подальшому проникненню води до непрогідратованих часток клінкера та появі вільних іонів.

При цьому мають місце деструктивні явища, що відображається на повній кривій кінетики структуроутворення (Е) спадами модуля швидкої еластичної деформації.

Третя стадія – утворення просторового каркасу кристалізаційної структури. Інтенсивно йдуть процеси структуроутворення, про що свідчить зростання модуля пружності та тепловиділення.

Коагуляційні контакти перетворюються на кристалізаційні, помітно зростає рівень гідратації. Значення рН і електропровідність на цій стадії стрімко знижуються, що пов'язано зі зменшенням рідкої фази та концентрації вільних іонів, які вступають у гідратні кристалічні з'єднання. Утворення просторового кристалізаційного каркасу супроводжується деструктивними явищами та закінчується певним спадом модуля пружності в результаті виниклих внутрішніх напруг у кристалізаційній структурі.

Четверта стадія – незначне зростання пружності й основне збільшення міцності; швидкість гідратації найменша.

Теорія чотирьох стадій структуроутворення цементного каменю упродовж твердіння може бути застосована у дослідженнях впливу вібраційного оброблення цементної суспензії з домішками поверхнево-активних речовин на процеси структуроутворення. Ці дослідження сприяли отриманню практичних результатів, які показали, що механічний вплив вібраційного оброблення залежить від частоти та часу, може в широких межах змінювати період формування структури, тобто дає можливість керувати процесом структуроутворення під час твердіння. Окрім того, визначений період структуроутворення, коли механічне та гідротермальне оброблення дають найкращі результати.

На прикладі оброблення цементної суспензії ультразвуковими коливаннями /ультразвуком/ (одразу після затворення цементу водою і в процесі структуроутворення) досліджували вплив механічної дії на періоди формування (перша та друга стадії) дисперсної структури цементного каменю (рис. 4.4)

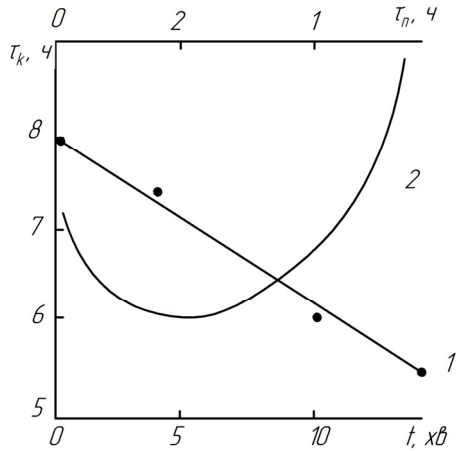


Рис. 4.4. Залежність періоду формування дисперсної структури від впливу ультразвуковим коливанням на цементну суспензію одразу після затворення протягом години t_1 (1) і через годину від початку затворення тривалість – 5 хв. (2)

Зі збільшенням тривалості оброблення ультразвуковими коливаннями одразу після затворення, період формування дисперсної структури лінійно зменшується. Упродовж оброблення ультразвуком у процесі формування, у різний час від початку затворення, ця залежність складніша за характером. Однак у всіх випадках період формування дисперсної структури обробленого ультразвуком цементного тіста менший, ніж у необробленого.

Таким чином очевидно, що швидкість структуроутворення може слугувати критерієм для визначення оптимального технологічного оброблення цементного тіста та розчинів і вже на ранній стадії структуроутворення дає можливість визначити кінцеву міцність цементного каменю.

Дослідження полімерцементів встановили, що фізико-механічні властивості цементного каменю зумовлені розвитком його дисперсної структури, починаючи з ранніх стадій, і вже вкінці першої стадії утворюється початкова дисперсна структура, яка визначає подальший розвиток процесу структуроутворення.

Визначення оптимального часу прикладання вібраційних і тепловологістних впливів показали, що ефективніше зростає міцність цементного каменю внаслідок прикладання вібраційного впливу в часі, який відповідає характерному початковому згину на повній

кривій структуроутворення або кінцю першої стадії. За кривими кінетики структуроутворення (залежно від тривалості попередньої витримки) встановили, що тепловологісне оброблення для максимального збільшення міцності цементного каменю найбільш доцільне напочатку третьої стадії.

Отже, кінетика структуроутворення на початковій стадії визначає подальший процес утворення структури та фізико-механічні властивості цементного каменю. Тому, коригуючи тривалість стадій цього процесу, тобто швидкість і характер розвитку структуроутворення на ранніх стадіях з допомогою різних впливів, можна в широких межах керувати цим процесом і фізико-механічними властивостями, визначаючи оптимальну, найбільш економічно доцільну, технологічну схему виготовлення якісного та довговічного бетону.

4.9. Корозійна стійкість цементного каменю

Стійкість цементного каменю до дії агресивних середовищ – важлива властивість, оскільки бетон в інженерних спорудах у процесі експлуатації підлягає агресивному впливу зовнішнього середовища: питної, технічної (мінералізованої) води, сумісної дії води та морозу, почерговому зволоженню і висушуванню, дії кислот і відходів хімічних підприємств.

Корозія цементного каменю – процес руйнування затверділого цементу в розчинах і бетонах під дією агресивних факторів (лугів, кислот).

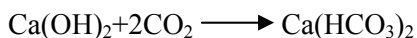
І. І. Леонович розрізняє фізичну корозію, коли складові речовини цементного каменю розчиняються під впливом агресивних факторів і хімічну корозію, коли складові речовини реагують з солями та кислотами, що знаходяться у мінералізованих водах. Новоутворені хімічні сполуки розчиняються у воді, чи кристалізуються у капілярах і порах цементного каменю. Це призводить до виникнення дефектів і подальшого руйнування цементного каменю і бетону.

В. М. Москвін розрізняє три види корозії цементного каменю під дією води. Перший вид корозії – розчинення складових компонентів цементного каменю, передусім гідроксиду кальцію – гідратного вапна $\text{Ca}(\text{OH})_2$ під дією проточних (м'яких) вод. Після

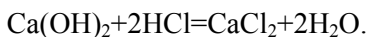
повного розчинення $\text{Ca}(\text{OH})_2$ зростає пористість цементного каменю і знижується його міцність.

Другий вид корозії – руйнування під дією мінералізованих вод у результаті хімічного обміну солей води з гідратними складовими цементного каменю і перш за все $\text{Ca}(\text{OH})_2$. У результаті утворюються легкорозчинні сполуки, які згодом вимиваються водою або відокремлюються у вигляді аморфної маси, що не має в'язких властивостей.

Наприклад, якщо у воді є вуглекислоти, відбувається хімічна реакція з утворенням бікарбонату кальцію, що добре розчиняється у воді



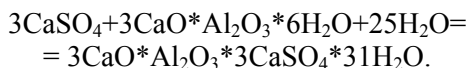
Якщо у воді є вільні кислоти, то $\text{Ca}(\text{OH})_2$ швидко розчиняється з утворенням легкорозчинної сполуки CaCl_2 за реакцією:



Третій вид корозії – процес руйнування, що виникає в результаті хімічної взаємодії солей, які містяться в мінералізованій воді, з гідратними складовими цементного каменю, що супроводжується появою важкорозчинних кристалічних новоутворень.

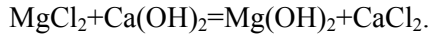
Збільшення обсягу кристалічних новоутворень орієнтовно в 2,5–3 рази призводить до повного руйнування цементного каменю і викликає появу деструктивних процесів у бетоні.

Особливо руйнівну дію чинять на цементний камінь сірчаноокислі солі MgSO_4 , CaSO_4 , NaSO_4 та інші. Аніон SO_3 , взаємодіючи з $\text{Ca}(\text{OH})_2$, утворює $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, кристали якого, за збільшення, викликають утворення тріщин і руйнувань у бетоні. За концентрацій сульфатних іонів SO_4^{2-} , більшу за 250 мг/л (наприклад, у морській воді) утворюється гідросульфоалюмінат кальцію з приєднанням значної кількості води



У результаті дії сірчаноокислих солей і води в цементному камені утворюються тріщини, з яких виділяються кристали гідросульфоалюмінату у вигляді білої речовини, яку ще називають «цементною бацилою».

Солі магнію (Mg), що містяться в значній кількості в морській воді та присутні в ґрунтових водах, взаємодіють з $\text{Ca}(\text{OH})_2$ і утворюють гідроокис магнію $\text{Mg}(\text{OH})_2$, який не має в'язких властивостей і розчинних сполук



При цьому $\text{Mg}(\text{OH})_2$ осідає в порах бетону у вигляді пухкої маси, а CaCl_2 добре вимивається, що призводить до руйнування цементного каменю.

Вільна вуглекислота у водному середовищі також руйнує цементний камінь, оскільки руйнує карбонатну плівку бетону внаслідок утворення розчинного бікарбонату кальцію



Корозію можуть викликати луги, які входять до складу цементу. Таку корозію називають *внутрішньою*, вона відбувається внаслідок взаємодії лугів з активним кремнеземом заповнювача.

Реакційно здатні, активні різновиди кремнезему (осадкові та метаморфічні породи, галька, кварцити, доломітизовані вапняки), які містяться в заповнювачах, можуть вступати у взаємодію з лугами цементу, утворюючи відкладення білого кольору на поверхні зерен заповнювача. Унаслідок такого руйнування бетону – утворюються тріщини, спостерігається лущення, короблення може відбутись через 8–10 років після закінчення будівництва.

Для попередження виникнення лужної корозії необхідно обмежити кількість лугів у цементі (бл. 0,5 %) тонкоподрібнені домішки, які реагують з лугами на початковій стадії твердіння.

Загалом, заходами захисту від корозії можуть бути:

- використання сульфатостійких цементів;
- створення щільної структури цементного каменю;
- захист поверхні водонепроникними плівками (гідроізоляція) з полімерних або бітумно-полімерних матеріалів.

4.10. Фізико-механічні характеристики портландцементу

Властивості портландцементу залежать від його мінерального складу, наявності домішок і тонкості мелення клінкеру. Тонкість мелення цементу характеризується кількістю порошку, якого через

сито № 0,08 проходить не менш як 85 % від маси. Тонкість мелення характеризується питомою поверхнею, тобто величиною сумарної поверхні зерен (см^2) у 1 г цементу. Питома поверхня звичайних портландцементів, зазвичай, 2000–3000 $\text{см}^2/\text{г}$, швидкотвердних 3500–5000 $\text{см}^2/\text{г}$. Тонше подрібнення може негативно впливати на властивості цементу (збільшення водопотреби, зниження міцності бетону).

Питома щільність цементу без мінеральних домішок 3,0–3,2 $\text{г}/\text{см}^3$, насипна щільність орієнтовно 1300–1400 $\text{кг}/\text{м}^3$.

Водопотреба – це кількість води, необхідна для приготування удобоукладальної бетонної суміші, що знаходиться в межах 22–26 % від маси цементу. Збільшення хімічно незв'язаної води утворює в твердому камені систему пор і капілярів, що спричиняє підвищення пористості, зниження міцності та морозостійкості.

Швидкість тужавіння – це час, протягом якого цементне тісто з пластичного стану переходить у твердий стан. Розрізняють початок тужавіння (початок зниження пластичності) і кінець тужавіння (повне твердіння). У портландцементу початок тужавіння настає не раніш як за 50 хвилин, а кінець не пізніш як за 10 годин після затворення.

Рівномірність зміни обсягу оцінюють за величиною деформацій у структурі твердого цементного каменю, які призводять до появи тріщин. Нерівномірність зміни обсягу зумовлена наявністю в цементі оксиду кальцію (CaO), оксиду магнію (MgO) і гіпсу. Цемент, який нерівномірно змінює обсяг упродовж твердіння є неякісним.

Активність цементу – це його здатність тверднути після затворення водою, перетворюючись на міцне каменевидне тіло. Активність і марку цементу визначають за показником міцності на згин половинок зразків – балок розміром 40x40x160 мм, виготовлених із цементно-піщаної суміші складу 1:3 за масою за водоцементного відношення В/Ц, яке забезпечує нормальну густину суміші (орієнтовно 0,4–0,5). Зразки ущільнюють на стандартному вібротрампаді та витримують у воді протягом 28-ми діб за температури орієнтовно 20 °С. Активність цементу покладена в основу його поділу на марки.

Міцність цементу – це результат когезії часток цементу між собою й адгезії їх до заповнювача.

Міцність портландцементу зростає нерівномірно, на третю добу вона сягає приблизно 40–50 % марки цементу, на сьому добу –

60–70 %. Далі зростання міцності портландцементу вповільнюється і на 28-му добу портландцемент набирає марочної міцності.

4.11. Різновиди портландцементу

Згідно з ДСТУ Б В.2.7-46-96 (ГОСТ 310.4) цементу загальнобудівельного призначення поділяють на такі типи та марки:

Тип I – портландцемент марок М 300, М 400, М500, М 550, М 600 (уміст мінеральних домішок від 0 до 5 %).

Тип II – портландцемент марок М 300, М 400, М500, М 550, М 600 (уміст мінеральних домішок від 6 до 35 %).

Тип III – шлакопортландцемент марок М 300, М 400, М500 (уміст гранульованого доменного шлаку від 35 до 80 %).

Тип IV – пуцолановий портландцемент марок М 300, М 400, М500 (уміст мінеральних домішок від 20 до 50 %).

Тип V – композиційний портландцемент марок М 300, М 400, М500 (уміст мінеральних домішок від 36 до 80 %, гранульованого доменного шлаку від 18 до 60 %, пуцолану від 10 до 40 %).

Швидкотвердний портландцемент – мінеральна в'язуча речовина, яка містить трикальцієвого силікату C_3S – 50-60 % і трикальцієвого алюмінату C_3A – 10–15 %, а сумарна кількість C_3S і C_3A повинна бути не меншою ніж 60–65 %. Тонкість мелення цього цементу збільшується до питомої поверхні – 3500–4000 $см^2/г$. Вміст активних мінеральних домішок у ньому не більший як 10 %. Такий цемент випускають марок М 400 Р, М 500 Р, (Р – позначення цемент високої міцності в ранньому віці).

Швидкотвердний портландцемент характеризує інтенсивніше нарощування міцності в початковий період твердіння: у віці 1-ї доби міцність на стиск його повинна бути не меншою як 20 МПа, 3-х діб – 25–30 МПа.

Використання такого цементу в будівництві скорочує строки тепловологого оброблення бетону, прискорює темпи будівництва, дозволяє виконувати бетонні роботи за від'ємних температур.

У дорожньому й аеродромному будівництвах його використання обмежене.

Пластифікований портландцемент виготовляють шляхом уведення під час сумісного подрібнення цементного клінкеру та двоводного гіпсу, 5%, поверхнево-активних пластифікувальних домішок, таких як: технічні лігносульфонати (ЛСТ) кількістю 0,15–0,25 %.

Лігносульфонати (кальцієві та натрієві солі лігносульфонових кислот) сорбуються на поверхні зерен цементу, утворюючи колоїдні гідрофільні плівки, які сприяють повнішому змочуванню зерен цементу водою, попереджаючи їх агрегацію (злипання) і забезпечуючи рухливість цементного тіста. Пластифікувальний ефект, якого досягають упродовж використання такого цементу дозволяє знизити кількість води для затворення (водоцементне відношення), підвищити водонепроникність, морозостійкість, щільність і сульфатостійкість бетону. Якщо водоцементне відношення залишити незмінним, можна знизити витрати цементу на 10–15 % без погіршення якості бетону.

Пластифіковані цементи тверднуть дещо повільніше ніж звичайні, однак згодом набувають такої самої міцності. Їх виготовляють тих самих марок, як і звичайний портландцемент. Вони більш економічні та широко використовувані в дорожньому та аеродромному будівництвах.

Гідрофобний портландцемент виготовляють сумісним подрібненням цементного клінкеру та двоводного гіпсу (3–5 %) з додаванням гідрофобізуючих домішок – милонафти, асидолу, олеїнової кислоти, кремнійорганічних сполук кількістю 0,08–0,25 % тощо.

Ці домішки, адсорбуючись на поверхні зерен цементу, утворюють гідрофобну плівку, яка знижує здатність цементу взаємодіяти з вологою повітря. Упродовж зберігання такий цемент не знижує активності, не коксується, є стійкішим до вологого середовища ніж звичайний. Окрім того, уведення гідрофобних домішок підвищує водонепроникність, морозо- і корозійну стійкість бетону.

Після затворення гідрофобного цементу водою, гідрофобні домішки вступають у реакцію з $\text{Ca}(\text{OH})_2$, у результаті чого відбувається повітрявтягування, і цементне тісто стає більш пластичним, а цементний камінь – морозостійким.

Гідрофобний цемент широко використовують у дорожньому, аеродромному та гідротехнічному будівництвах.

Сульфатостійкий портландцемент (ДСТУ Б В.2.7–85–99, ГОСТ 22266) отримують тонким подрібненням клінкеру з вмістом C_3A не більш як 5 % і C_3S не більш як 50 %. Глиноземистий модуль $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$ не менш як 0,6 – сульфатостійкий портландцемент може вміщувати активні домішки (гранульовані шлаки – доменні або електросталеплавильні, пуццолани) кількістю 10–20 %. Сульф-

фатостійкий портландцемент виготовляють марок М400, М500. Знижений вміст C_3A і C_3S зменшує активність цементу, у зв'язку з чим його міцність зростає повільно. Його характеризує висока корозійна стійкість і достатня міцність. Його використовують для бетонування масивних залізобетонних конструкцій. У дорожньому й аеродромному будівництвах використовують обмежено через його високу вартість.

Портландцемент дорожній і аеродромний буває звичайним, пластифікованим і гідрофобним. У такому цементі неприпустиме застосування тонкоподрібнених активних мінеральних домішок, окрім гранульованого доменного шлаку кількістю не більшою як 15 % і обмежений вміст C_3A (не більш як 8 %).

Рекомендований наступний мінералогічний склад портландцементного клінкеру: 50–60 % C_3S , 15–25 % C_2S , 15–25 % C_4AF , не більш як 8 % C_3A .

Дорожній і аеродромний портландцементи випускають згідно з ДСТУ Б В.2.7–46–96 марок М 300, М 400, М 500, М 550, М 600. Його отримують на основі клінкеру, який містить не більш як 8 % C_3A і підвищену кількість C_3S і C_4AF (30–35 %). До складу цементу не припустиме додавання інертних і активних мінеральних домішок.

Такий цемент характеризують підвищена міцність на розтяг, згин, удар, низька стиранність, висока морозостійкість і незначна усадка.

Для забезпечення цих властивостей після подрібнення цементу до його складу вводять пластифікувальні і гідрофобно-пластифікувальні домішки. Початок тужавіння такого цементу повинен наставати не пізніше як через 2 год. після затворення водою, що пов'язане з необхідністю його перевезення на значну відстань для бетонування доріг і аеродромів.

Шлакопортландцемент – продукт сумісного подрібнення портландцементного клінкеру з 20–60 % доменного гранульованого шлаку та 3% гіпсу. Шлакопортландцемент можна отримати шляхом ретельного змішування окремо подрібнених компонентів.

Згідно з ДСТУ Б В.2.7–46–96 випускають двох типів шлакопортландцементу: ЩПЦ III/A і ЩПЦ III/B, які містять 36–65 % і 66–80 % гранульованого доменного шлаку відповідно. Різновидами шла-

копортландцементу є швидкотвердний, вапняково-шлаковий і сульфатно-шлаковий.

Доменний гранульований шлак, що є головним сировинним, активним компонентом для виробництва шлакопортландцементу за хімічним складом наближається до портландцементу, але містить менше СаО і більше кремнезему, глинозему. Гранульований шлак за швидкого охолодження отримує скловидну структуру (скловидної речовини в основних шлаках 40–50 %, у кислих 80–90 %). Взаємодіючи з гідроксидом кальцію, утворює низькоосновні гідросилікати CSH (I) і гідроалюмінати кальцію C_2AH_8 . Щільність шлакопортландцементу знаходиться в межах 2,5–3 г/см³. Насипна щільність 900–1200 кг/м³, початок тужавіння через 45 хвилин, кінець не пізніше як за 12 годин від початку затворення. Це повільно твердіючий цемент, який за зниження температури уповільнює твердіння.

У разі пропарювання або запарювання в автоклавах процес твердіння прискорюється.

Шлакопортландцемент має підвищену корозійну стійкість і сульфатостійкість, що пояснюється зв'язуванням гідроксиду кальцію, який виділяється упродовж гідролізу зі шлаковим компонентом. Окрім того, цей вид цементу характеризує низька екзотерія (виділення тепла) під час твердіння, високою місткістю повітря і морозостійкістю.

Його досить широко використовують у дорожній і аеродромній галузях як місцевий економічний матеріал з високими експлуатаційними властивостями. Собівартість шлакопортландцементу значно менша ніж портландцементу за рахунок заміни частини клінкеру гранульованим доменним шлаком, що скорочує витрати палива й електроенергії на підготовку сировини. Вартість 1 т шлакопортландцементу на 15–20 % нижча від вартості звичайного цементу.

Окрім того, використання шлаків у складі шлакопортландцементу сприяє вирішенню важливої завдання – охорони навколишнього середовища, оскільки скорочуються корисні площі, зайняті відвалами шлаку.

Пуцолановий цемент отримують сумісним подрібненням портландцементного клінкеру, що містить 20–50 % активних домішок і двоводного гіпсу (3–5 %).

Як активні мінеральні домішки використовують природні або штучні силікатні матеріали, які в тонкоподрібненому вигляді у разі змішування з водою не тверднуть, але за гідратації цементу можуть зв'язувати гідроксид кальцію й утворювати практично нерозчинний гідросилікат кальцію.

Природні домішки – це породи осадкового або вулканічного походження. До домішок вулканічного походження (пуцоланів) відносять вулканічний попіл, туф, пемзу, які за мінералогічним складом представлені скловидною фазою з кристалічними включеннями.

Домішки штучного походження представлені кислими золами і топковими шлаками. Використовують як основні, так і кислі шлаки з питомою щільністю 2,6–3,2 г/см³, тонкістю подрібнення 3000–3500 см²/г.

Пуцолановий цемент виготовляють марок М 300 і М 400. Питома щільність нижча ніж у звичайного портландцементу та складає 2,7–2,9 г/см³. Об'ємна щільність у пухкому стані 1000–1200 кг/м³. Строки тужавіння практично такі самі як у портландцементу, але процес твердіння спочатку (близько 30 діб) відбувається повільніше, а потім, в умовах достатньої вологості і за температури, вищій ніж 10 °С стає дещо інтенсивнішим.

Загалом, пуцоланові цементи характеризують низька морозостійкість і нестабільність властивостей в умовах почергового зволоження і висушування. Тому в дорожньому й аеродромному будівництвах такі цементи практично не використовують.

Композиційний портландцемент відповідно до класифікації, наведеної в ДСТУ Б В.2.7–46–96, є цементом складеним із домених гранульованих шлаків і мінеральних домішок – золи-виносу ТЕЦ, природніх пуцоланів і вапняків оптимального складу. Відповідно до класифікації (ДСТУ Б В.2.7–46–96) виробляють композиційний портландцемент двох типів: II і V. Композиційний портландцемент II типу поділяють на підвиди А і Б. Підвид А містить 80–94 % портландцементного клінкеру та 6–20 % мінеральних домішок і додаткових компонентів.

Підвид Б складається з 65–79 % клінкеру, 21–35 % мінеральних домішок. Композиційний портландцемент V типу теж поділяють на підвиди А і Б. Підвид А містить 40–64 % клінкеру, 18–40 % домен-

ного гранульованого шлаку, 10–20 % пуцолану та золи–виносу, а також 0–5 % додаткових складових.

Підвид Б містить 20–39 % клінкеру, 41–60 % доменного гранульованого шлаку, 20–40 % пуцолану та золи–виносу, а також 0–5 % додаткових складових.

Різновидом композиційного портландцементу є багатокомпонентні цементи (цементи з мікронаповнювачами), які раніше були відомі як змішані портландцементи, до складу яких під час подрібнення вводили певну кількість кварцового піску.

Мікронаповнювачі не є інертними домішками, вони беруть участь у формуванні структури цементного каменю, і на їх поверхні утворюються високодисперсні новоутворення.

Як мікронаповнювачі використовують золу–винос, шлаки, відходи виробництва феросплавів і кристалічного каменю (мікрокремнезем).

Багатокомпонентні цементи з мікрокремнеземом використовують для виробництва бетонів спеціального призначення, щільних, високоміцних і корозійностійких.

В аеродромному будівництві їх використовують в окремих випадках, у дорожньому будівництві практично не використовують.

Шлаколуужні цементи за ДСТУ Б В.2.7–24–95 отримують шляхом змішування гранульованих металургійних шлаків з розчинами лужних металів (калію, натрію) або з побічних продуктів виробництв, що утримують сполуки лужних металів або сумісним меленням шлаків з малогігроскопічними з'єднаннями цих металів.

Для виробництва шлаколуужних в'язучих можна використовувати різні види шлаків – доменні, мартенівські, електрофосфорні, титанові, нікелеві тощо. Частіше використовують доменні шлаки. Хімічний склад доменних гранульованих шлаків вітчизняного виробництва, що можна використовувати для виробництва шлаколуужних в'язучих речовин наведені в табл. 4.2.

Складовою частиною шлаколуужних цементів є лужні компоненти, водні розчини яких вступають у лужну реакцію. Їх кількість складає 15–25 % від маси шлаку у перерахунку на суху речовину або у вигляді водних розчинів 18–40 % концентрації. Активність в'язучих речовин значною мірою визначає структура, хімічно-мінералогічний склад шлаку та природа лужного компоненту.

Таблиця 4.2

**Хімічний склад доменних гранульованих шлаків
вітчизняного виробництва**

Гранульовані шлаки комбінатів	Вміст оксидів за масою. %								Mo
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO	MnO	TiO	
Дніпропет- ровський	36,3	6,75	2,60	45,8	2,94	2,60	1,63	-	1,1
Криворізький	39,5	6,49	0,12	47,1	3,10	1,74	1,15	-	1,1
Дніпродзер- жинський	37,2	6,70	1,35	48,2	4,85	0,73	0,36	0,17	1,2
АТ «Азовсталь»	37,1	8,95	-	43,8	5,04	4,40	0,47	-	1,0
«Запоріжсталь»	39	6,90	-	48,6	3,80	1,93	0,89	-	1,1
Макіївський	36,5	9,0	-	48,6	2,60	2,16	0,89	-	1,1

Для отримання шлаколужного цементу шлак повинен мати такі характеристики: щільність – 2,6–3,2 г/см³, дрібність мелення не меншу як 300 м²/кг. Щільність розчину лужного компоненту визначають залежно від необхідної активності в'язучої речовини, яка може бути в межах 1100–1300 кг/м³.

Строки тужавіння можна регулювати введенням домішок, тонкістю подрібнення цементу та спеціальними технологічними заходами. Так, можна використовувати спосіб двохстадійного затворення бетонної суміші спочатку розчином рідкого скла щільністю 1100–1150 кг/м³ за Р/Ш=0,10–0,15, а після 2–3 хв. перемішування – рідким склом, що залишилось. Пористість характеризує структуру шлаколужного каменю. За практично однакової загальної пористості, капілярна пористість шлаколужного каменю нижча ніж портландцементного, а мікропористість вища. Порівняльні характеристики пористості штучного каменю, отриманого на основі портландцементу і шлаколужної в'язучої речовини наведені в таблиці 4.3.

Порівняння пористості шлаколужного та портландцементного каменів показали, що пористість першого знижується у часі швидше ніж другого. Це зумовлює високу щільність матеріалів на основі шлаколужної в'язучої речовини, що забезпечить водонепроникність і підвищену морозостійкість.

Таблиця 4.3

**Порівняння пористості штучного каменю на основі
портландцементу і шлаколузної в'язучої речовини**

Показник	Шлаколузний камінь за твердіння в умовах		Портландцементний камінь, за твердіння в нормальних умовах
	нормальних	пропарювання	
Загальна пористість, %	43,8	42,6	43,5
Мікро пористість, %	16,1	15,2	14,5
Капілярна пористість, %, зокрема з розмірами пор, нм:			
$d_1 > 2 \cdot 10^{-11}$	27,7	17,4	29
$2 \cdot 10^{-11} > d_2 > 2 \cdot 10^{-12}$	0,3	0,2	6,2
$2 \cdot 10^{-12} > d_3 > 2 \cdot 10^{-13}$	1,9	2,4	2,6
$2 \cdot 10^{-13} > d_4 > 2 \cdot 10^{-14}$	3,8	7,8	5,3
за різниці $8 \cdot 10^{-14}$	5	6,4	11,5
$4 > d_3 > 3 \cdot 10^{-14}$	16,6	10,6	3,4

На основі шлаколузних в'язучих речовин можна отримувати легкі та важкі бетони міцністю 30–120 МПа. Унаслідок того, що компоненти в'язучої речовини вступають у взаємодію з глинистими мінералами, як заповнювачі; у таких бетонах, можна використовувати дрібні піски, супіски та легкі суглинки.

Порівняння властивостей шлаколузних цементів з традиційними (портландцементом) дає змогу виділити такі переваги:

- сировиною для їх виробництва є розповсюджені мінеральні ресурси та побічні продукти – металургійні шлаки;
- екзотермічний ефект у 2–3 рази менший, що пов'язано з відсутністю у їх складі високоосновних силікатів кальцію C_3S ;

– стійкість до агресивних середовищ, що пояснює наявність у складі продуктів гідратації низькоосновних гідросилікатів кальцію і лужних гідроалюмосилікатів;

– низька пористість, що дозволяє отримувати камінь з підвищеними фізико–механічними характеристиками;

– у процесі виробництва практично не відбувається викидання шкідливих речовин в атмосферу.

Шлаколузний цемент і його різновиди – безусадковий цемент та сульфатостійкий цемент використовують у дорожньому і аеродромному будівництвах.

Питання для самоконтролю



1. Схарактеризуйте неорганічні (мінеральні) в'язучі речовини.
2. Як класифікують неорганічні в'язучі речовини?
3. Що таке будівельне повітряне вапно, та яких видів воно буває?
4. Що таке магнезіальні в'язучі речовини?
5. Схарактеризуйте взаємодію портландцементу з водою.
6. Як відбувається структуроутворення портландцементу?
7. Схарактеризуйте види корозії цементного каменю під дією води.
8. Назвіть, які існують різновиди портландцементу.

Розділ 5. ОРГАНІЧНІ В'ЯЖУЧІ РЕЧОВИНИ. СТРУКТУРА ТА ВЛАСТИВОСТІ

5.1. Види органічних в'язучих речовин

Органічні в'язучі речовини – це природні чи штучні тверді, в'язкопластичні і рідкі матеріали, що складаються з хімічних сполук, молекули яких містять атоми вуглеводу.

Органічні в'язучі речовини можна розглядати як дисперсні системи, представлені сумішшю різних сполук, зокрема метанових C_nH_{2n+2} , нафтових C_nH_{2n} , ароматичних C_nH_{2n-6} і гетероциклічних, а також високомолекулярними вуглеводами та неметалевими похідними.

Властивості вуглеводних сполук залежать від характеру зв'язків між окремими атомами. Властивість атомів вуглеводів утворювати ланцюжки, кільця, складні ґратки, до яких входять інші елементи – гетероцепні речовини (O, N, Si, S), що зумовлює існування, на сьогодні, більш як мільйону речовин, кількість яких безперервно збільшується.

Органічні в'язучі є гідрофобними і леткими матеріалами, більшість з яких може бути розчинена в органічних розчинниках (бензолі, толуолі, гасі, лігроїні) тощо, а деякі можуть тільки набрякати в них. Вони також мають достатню адгезію до більшості матеріалів органічного та неорганічного походження.

Сировиною для виробництва органічних в'язучих речовин слугують продукти органічного походження, зокрема нафта, кам'яне вугілля, горючі сланці, торф. Ця сировина підлягає хімічному переробленню (фрикційній розгонці, сухому деструктивному переробленню), у результаті чого отримують бітум, дьоготь і смолоподібні залишки.

Бітумні і дьогтеві в'язучі речовини – це група органічних в'язучих речовин, які складаються з високомолекулярних вуглеводів і їх неметалевих похідних (сполуки вуглеводів з сіркою, киснем, азотом). Головними ознаками цих в'язучих речовин є їх властивість розм'якшуватись упродовж нагрівання і відновлювати свою початкову в'язкість упродовж охолодження.

Органічні в'язучі матеріали – бітуми та дьогті мають коагуляційну структуру, їх поділяють на бітуми – природні, нафтові, сланцеві та дьогті – кам'яновугільні, торф'яні, деревинні.

Використовувати органічні в'язучі речовини 5000–6000 років тому – природний бітум використовували для будівництва єгипетських і вавілонських споруд – храмів, гробниць та інших ритуальних споруд.

У VI ст. до н.е. нафтовий бітум почали використовувати для будівництва каналів, тунелів, дорожніх покриттів. Особливо широко його використовувати для будівельних робіт почали всередині XIX ст і нині для будівництва доріг і аеродромів використовують 60–70 % від загального обсягу нафтових бітумів у світі.

5.2. Види бітумних в'язучих речовин

Існують природні та штучні бітумні в'язучі речовини.

Природні бітуми являють собою в'язучу речовину чорного або темно-коричневого кольору, яка утворилась у результаті природного процесу полімеризації нафти. За структурою і фізико-хімічними властивостями вони близькі до штучних нафтових бітумів. У чистому вигляді зустрічаються рідко. Частіш за все залягають пісках, піщаниках, бітумінозних породах. Використання їх обмежене внаслідок високої вартості та дуже незначної кількості.

Нафтові бітуми (штучні) отримують переробкою нафтової сировини способом окислення або крекінгом нафти. Окислені бітуми отримують продуванням повітрям нафтових залишків відгонення із мазуту масляних фракцій – гудрону, тобто гудрон і є головною сировиною для отримання нафтових бітумів. Упродовж окислення кисень повітря реагує з воднем, який міститься в залишках, утворюючи водяну пару. Такий процес дозволяє ущільнювати нафтові залишки шляхом їх полімеризації і загустіння.

Крекінгові бітуми отримують шляхом розкладання за високої температури нафти та нафтових масел.

Окрім того, існують залишкові бітуми, які отримують у результаті атмосферно-вакуумного переганання високосмолистих залишків нафти, після відбирання бензину, гасу та інших масляних фракцій.

У дорожньому й аеродромному будівництвах головним чином використовують окислені бітуми.

5.3. Хімічний склад бітумів

Залежно від в'язкості бітуми поділяють на тверді, напівтверді та рідкі.

До хімічного складу бітумів входять такі елементи: вуглевод – 70–87%; водень – 10–12 %; сірка – 1–2 %; кисень – 1–3 %; азот 0–2 %.

Хімічні елементи містяться в бітумах у вигляді різних похідних вуглеводів, представлених функціональними групами та зв'язками. Завдяки цим групам відбуваються зміни хімічних властивостей органічних молекул. У бітумах наявні такі групи та зв'язки:

$-OH-$	гідроксильна;
$>C=O-$	карбонільна;
$-C \begin{matrix} =O \\ -OH \end{matrix} -$	карбокисильно-полярна;
$-C \begin{matrix} =O \\ -H \end{matrix} -$	альдегідна;
$-C=C-$	(вуглевод-вуглеродний подвійний зв'язок)
$-C \equiv C-$	(вуглевод-вуглеродний потрійний зв'язок)
$-OOR-$	складноєфірна
$CH_2=$	метиленова
$CH-$	метилова

Кількісно в бітумі переважають два елементи: вуглевод і водень. Це так звані «вуглеводні елементи».

5.3.1. Груповий склад бітумів

До складу бітумів входять високомолекулярні речовини твердого та рідкого станів. Тверду (дисперсну) фазу складають асфальтени, карбени, карбоїди, рідку фазу (дисперсійне середовище) – мальтени.

Груповий склад бітумів наведений у табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Груповий склад бітумів

Групи, які входять до складу бітумів	Положення груп у компоненті бітум-розчин	Вміст у бітумі, %	Зовнішній вигляд кожної групи	Питома вага	Вплив груп на стан бітуму
Масла	У компоненті – мальтени	45-60	Рідина без кольору	0,6-1,0	Збільшують рухомість і текучість
Смоли м'які	Те ж	13-42	Тягуча рідина різної консистенції. Колір від жовтого до світло-бурого	1,0-1,1	Збільшують в'язкість – пластичність
Смоли тверді	У компоненті – асфальтени	13-42	Те саме	1,0-1,1	Те саме
Асфальтени	Те саме	8-30	Тверді аморфні речовини. Колір від бурого до чорного	1,1-1,15	Збільшують в'язкість
Карбени	Те саме	3	Тверді речовини чорного кольору	1,1-1,15	Те саме
Карбоїди	Те саме	3	Те саме	1,1-1,15	Те саме
Асфальто-генові кислоти та їх ангідриди	Те саме	3	Смолоподібні речовини	1,0	Те саме

Масла являють собою складну суміш високомолекулярних вуглеводів – ациклічних сполук (парафінів) і ізоциклічних сполук (нафтенів) ациклічного та ароматичного рядів, входять до мальте-

нової частини бітумів, мають молекулярну масу 450–600. У незначній кількості в маслах можуть бути речовини, що відносять до гетероциклічних і гібридних сполук.

Гібридними називають змішані високомолекулярні сполуки конденсованої структури, які містять атоми різних елементів, наприклад, сірки, кисню, азоту, металу.

Смоли – високомолекулярні вуглеводи, що входять до мальтевої частини бітумів і в своїй масі належать до гетероциклічних і гібридних сполук. Мають молекулярну масу 1000–1500. Смоли характеризує значна полярність, тобто поверхнева активність, що забезпечує зчеплення бітумів з поверхнею кам'яних матеріалів, тобто адгезія бітуму.

Мальтени – це в'язучі пластифікувальні речовини, які розчиняють асфальтени. Розчинність асфальтенів у мальтенах залежить від їх природи та властивостей масел і смол.

Асфальтени – це гетероциклічні сполуки, що мають молекулярну масу 1500–10000. Від їх хімічної природи та структури, розміру та форми молекул, концентрації залежать фізико-механічні властивості бітумів.

С. В. Шестоперов визначив показник дисперсності (D) асфальтенів, який залежить від їх структурування в мальтенах і забезпечує стійкість бітуму до дії різних зовнішніх умов.

Показник дисперсності (D) є відношенням у відсотках суми масових часток смол (C) і мальтенів (M) до суми масових часток асфальтенів у насичених речовинах мальтенів ($M_{н.р.}$)

$$D = \frac{C + M}{M_{н.р.}} 100. \quad (5.1)$$

Бітуми з низькими значеннями D більшою мірою нестабільні за нагрівання та окислення, ніж бітуми з більшим показником дисперсності (D). Окрім того, низьке значення показника дисперсності (D) свідчить, про те, що асфальтени в бітумі представлені у вигляді структур-асоціацій, і отже будь-який тепловий вплив може призвести до їх внутрішнього розшарування, тобто порушення агрегатної стійкості – синерезису.

В. О. Золотарьов вважає, що фізико-хімічні властивості композиційного матеріалу – асфальтового бетону залежать, головним чином, від структурної характеристики бітумів, що визначають за

показником дисперсності (Д), який встановлює кількісне співвідношення складових речовин (табл. 5.2)

$$D = \frac{C+Ц}{A+H}, \quad (5.2)$$

де С – смоли; Ц – циклічні вуглеводи; А – асфальтени; Н – насичені вуглеводи.

Кількісне співвідношення складових (табл. 5.2) можна виразити співвідношенням:

$$\rho = \frac{\text{Вміст асфальтенів (\% за масою)}}{(C:H) \text{ асфальтенів} \bullet (CxH) \text{ мальтенів}} \quad (5.3)$$

Це співвідношення враховує хімічні зв'язки в структурному просторі бітумів, які впливають на його взаємодію з мінеральним матеріалом. Нижче зазначені співвідношення складових речовин бітуму та її показник дисперсності (табл. 5.2).

Таблиця 5.2

Співвідношення складових речовин бітуму

В'язучі бітуми, номери зразків	Вміст, % за масою				Показник дисперсності (Д)
	Асфальтенів (А)	Смол (С)	Насичених вуглеводів, (Н)	Циклічних вуглеводів, (Ц)	
1, БНД 60/90	17,8	17,2	49,0	16,0	0,50
2	19,0	13,0	48,0	20,0	0,49
3	24,6	20,4	40,0	15,0	0,55
4	9,3	41,7	40,0	9,0	1,08

«1» – Д=0,50 низький, А і Н наявні у значній кількості, бітум погано диспергований; «4» – Д=1,08 високий, С і Ц наявні у значній кількості, бітум має недостатньо розвинену внутрішню структуру.

Карбени та карбоїди – високомолекулярні сполуки найбільш збагачені вуглеводом.

Карбени за своїми властивостями подібні до асфальтенів і розчиняються практично в тих самих розчинниках.

Карбоїди – специфічна група твердих речовин у бітумах, нерозчинна в жодному розчиннику, окрім бензолу та чотирихлористого водню.

Асфальтогенові кислоти і їх ангідриди – речовини коричнево-сірого кольору, маслоподібної або смолистої консистенції. Щільність вища за 1000 кг/м^3 , добре розчиняються в спирті, хлороформі. Про вміст асфальтогенових кислот і їх ангідридів можна судити за кислотним числом і числом омилення. Кислотне число повинне бути не вищим за $0,5\text{--}1,0 \text{ мг/КОН}$, число омилення у межах $10\text{--}30 \text{ мг/КОН}$.

Асфальтогенові кислоти та їх ангідриди найбільш полярні компоненти бітуму, тобто найбільш поверхнево-активні. Їх вміст визначає інтенсивність прилипання (адгезію) бітуму до кам'яного матеріалу.

5.3.2. Структура бітумів

Залежно від в'язкості бітуми поділяють на тверді, напівтверді та рідкі.

За фізико-хімічними поняттями структура бітумів виражена колоїдною, міцелярною, дисперсною системами Р-Т (Р-рідина, Т-тверде тіло) різної в'язкості, що дозволяє віднести її до трьох типів: гель, золь і золь-гель (проміжний). Міцелярна колоїдна система вирізняється тим, що її первинна найдрібніша частка – міцела, складова дисперсної фази (твердої частки), являє собою ядро-кристаліт ультрамікроскопічних розмірів, навколо якого розміщується рідка фаза – дисперсійне середовище, що складається з багатьох шарів (сольватних оболонок), які утримують ядро. У ядро завжди входить і первинний адсорбційний шар.

Міцела існує за рахунок агрегування (об'єднання) окремих молекул в макромолекули в тому випадку, якщо сили молекулярного зчеплення вищі за сили взаємодії молекул дисперсійного середовища з молекулами розчинника.

Це характерно для ліофільних колоїдних систем, у яких відбуваються процеси коагуляції, наявна значна кількість дисперсійного середовища, що міцно утримується на коагулятах у різних умовах.

На відміну від міцели ліофобної системи (процеси коагуляції в якій, зазвичай, незворотні й осідання не має дисперсійного середовища), не мають сольватних оболонок на твердих частках

дисперсної фази. Це системи двофазного стану, двофазні (гетерогенні). Ще існують системи однофазного стану (гомогенні), наприклад, ненасичені розчини різних концентрацій.

Система «гель» характерна для в'язучих бітумів і складається з підвищеної кількості рідкої складової (масел і смол), що створює умови для пептизації твердих складових (асфальтенів) бітуму. Залежно від співвідношення масел і смол система буде рідкою чи в'язучою, твердою, еластичною чи крихкою.

Система «золь» характерна для рідких бітумів і складається з часток тонкоподрібненої твердої складової і дрібних часток рідини (крапель), які рівномірно розподілені в об'ємі.

Система «золь-гель» має проміжне положення між цими структурами та залежно від співвідношення масел, смол і асфальтенів може бути характерною для в'язучих чи рідких бітумів.

На основі вивчення структурно-реологічних властивостей бітумів з врахуванням вмісту структуроутворювальних компонентів А. С. Колбановська вирізняла три типи бітумів:

- бітуми першого типу (гель) – містять більш як 25 % асфальтенів за незначної концентрації розчину смол у вуглеводнях і мають коагуляційну структуру;

- бітуми другого типу (золь) – мають у своєму складі менше за 18 % асфальтенів за високої концентрації смол і можуть бути віднесені до рідкоподібних високомолекулярних систем, у яких головну роль відіграє середовище, у якому розподілені асфальтени;

- бітуми третього типу (золь-гель) – містять 20–23 % асфальтенів і за своєю структурою є проміжним типом між першими двома, відрізняючись початковою коагуляційною структурою від асфальтенів, які знаходяться у досить в'язкому розчині смол.

Таким чином, з позиції фізико-хімічної механіки, бітуми можна розглядати як однорідні суміші – гомогенні розчини або однофазні системи різних високомолекулярних вуглеводів, які за певних умов переходять у двофазні – гетерогенні.

5.4. Фізико-механічні властивості нафтових бітумів

Фізико-механічні властивості бітумів пов'язані з властивостями органічних молекул високомолекулярних вуглеводів зміцнювати свою структуру (утворювати асоціації) під впливом зовнішніх факторів. Співвідношення між основними групами сполук, що входять

до складу бітуму, визначають його основні властивості: полярність, змочування, в'язкість, пластичність, теплостійкість, розм'якшення, крихкість, стабільність властивостей у часі (старіння).

Полярність – електрохімічна властивість бітумів, що характеризує розподіл електричних зарядів у молекулах компонентів бітуму та впливає на величину зчеплення (присипання) до кам'яного матеріалу (адгезію).

Полярність визначають коефіцієнтом розчинності (α) у відсотковому відношенні розчинності бітуму в полярному і неполярному розчинниках.

$$\alpha = \frac{A}{B} \cdot 100\%, \quad (5.4)$$

де A – розчинність бітуму в метиловому спирті; B – розчинність бітуму в бензолі.

Малополярний нафтовий бітум зчіплюється (адгезія) з поверхнею основних гідрофобних мінеральних матеріалів (вапняки, основні шлаки), а полярні в'язжучі речовини (природні, сланцеві бітуми і дьогті) з гідрофільними кислими мінеральними матеріалами (кварцем, гранітом, сієнітом).

Мінеральні матеріали, у яких на межі розподілу з вуглеводною речовиною (бітумом) різниця полярностей менша, ніж з водою (краще змочуються бітумом) – називають *гідрофобними*. Поверхню таких матеріалів називають гідрофобною чи олеофільною або *бітумофільною*.

Мінеральні матеріали, у яких на межі розподілу з бітумом різниця полярностей буде більшою, ніж з водою (краще змочуються водою) називають *гідрофільними*.

Тверда поверхня тим краще змочується рідиною, чим менші сили зчеплення між молекулами, що її утворюють (когезія) і чим більші сили зчеплення між молекулами рідини та молекулами твердого тіла (адгезія).

За критерій гідрофільності матеріалів можна взяти коефіцієнт гідрофільності:

$$\beta = \frac{K_n}{K_n} \quad (5.5)$$

де $K_{\text{п}}$ – теплота змочування водою в кал/г (полярна рідина); $K_{\text{н}}$ – теплота змочування бензолом у кал/г (неполярна рідина);

Якщо $\beta < 1$ – поверхня твердого тіла гідрофобна, $\beta > 1$ – гідрофільна.

Вибіркова дифузія (проникнення) компонентів бітуму в мінеральний матеріал

У разі торкання двох фаз, що не змішуються, разом з адсорбцією можуть відбуватися й інші сорбційні процеси. Зокрема, може відбуватись просочування маси однієї фази в глибину другої за рахунок дифузії вздовж вузьких капілярів. Проникнення може мати місце у разі використання пористих мінеральних матеріалів. Особливості взаємодії бітуму з пористими матеріалами зумовлені, з одного боку, характером поверхні та структурою адсорбенту (розмірами та місцем розташування пор), а з іншого – особливостями бітуму (активністю і груповим складом).

Наявність мікропор на поверхні мінеральних часток суттєво змінює умови їх взаємодії з бітумом, оскільки вони мають значний адсорбційний потенціал завдяки чому в них сорбується значна частина поверхнево-активних компонентів бітуму.

У працях В. М. Смирнова було визначено, що внаслідок взаємодії пористих адсорбентів з бітумом асфальтени адсорбуються на поверхні мінеральних зерен, смоли сорбуються в дрібних порах на поверхні часток.

Найменш поверхнево-активний і найбільш в'язучий компонент бітуму – смоли – можуть просочуватись по капілярах у глибину матеріалу. Цей процес починається під час об'єднання мінерального матеріалу з бітумом упродовж змішування і продовжується потім в асфальтобетоні довгий час навіть за експлуатації покриттів.

Таким чином, у разі використання пористих мінеральних матеріалів у адсорбційних шарах бітуму на поверхні мінеральних часток дещо зменшується кількість масел і смол. Внаслідок збільшення кількості асфальтенів в'язкість поверхневих шарів бітуму зростає.

Такими особливостями взаємодії бітуму з пористими матеріалами можна пояснити специфічні властивості асфальтобетонів, мінеральна частина яких складається з мартенівських шлаків, тонкопористих вапняків тощо. Для таких асфальтобетонів характерні

висока механічна міцність, підвищена теплостійкість та інтенсивне збільшення жорсткості в часі (старіння).

Дослідженнями було встановлено, що для компенсації вибіркової дифузії бітуму в таких мінеральних матеріалах необхідно використовувати менш в'язучі бітуми та збільшувати кількість бітуму в суміші на 2–3 %. Для попередження підвищеної жорсткості, а отже й схильності до тріщиноутворення асфальтобетону, що містить пористі мінеральні матеріали, необхідно використовувати в них бітуми з глибиною проникнення голки (в'язкістю) на 20–40 одиниць вищою, ніж у бітумах, придатних для даних кліматичних умов.

Попереджує вибіркочну дифузію бітуму фізико-хімічна активація мінерального порошку, унаслідок якої на зернах утворюється структурно-механічний бар'єр, який зупиняє вибіркоче фільтрування компонентів бітуму.

Таким чином, врахування всіх особливостей взаємодії мінеральних і в'язучих матеріалів у асфальтобетоні та різних факторів (співвідношення кількості вільного й адсорбованого бітумів, вибіркова дифузія компонентів бітуму в мінеральні матеріали) дозволить правильно орієнтуватись у процесах структуроутворення в асфальтобетоні та шляхах регулювання його структури.

Змочування в'язучою речовиною поверхні кам'яного матеріалу визначається полярністю в'язучого матеріалу і характеризується крайовим кутом, що утворюється поверхнею мінерального матеріалу та дотичною, проведеною до поверхні краплі рідини в точці доторкання фаз. Чим менший кут, тим краща змочуваність.

В'язкість – одна з найголовніших характеристик бітуму, що визначає технологічні параметри застосування матеріалу – температурний і годинний режими перемішування з мінеральними матеріалами, удобоукладальність асфальтобетонних сумішей, ущільнення і строки відкриття руху транспорту. Забезпечує теплостійкість і морозостійкість асфальтобетону. В'язкість не повинна раптово змінюватись під впливом погодно-кліматичних факторів, її визначають склад, структура бітумів, перш за все, вміст асфальтенів та їх середня молекулярна маса. Оптимальне значення в'язкості бітумів на стадії змішування з мінеральними заповнювачами складає 0,2 Па*с, на стадії ущільнення протягом укладання

дорожнього одягу – 20 Па*с. Залежно від в'язкості бітуми поділяють на тверді, в'язучі (напівтверді) і рідкі.

В'язкість твердих і в'язучих бітумів визначає глибина проникнення голки (пенетрація) у разі дії на неї вантажу масою 100 г протягом 5 с за t 25 °С (прилад – пенетрометр).

В'язкість (умовна) рідких бітумів характеризує час витікання (у секундах) 50 мл в'язучої речовини через калібрований отвір (d –5мм) за певної температури (60 °С) і знаходиться в межах $P_{25}=25\dots 200$ с.

За значеннями в'язкості бітуми поділяють на марки. Позначення марки бітуму складається з літер, які пов'язані з його призначенням, наприклад, БНД (бітум нафтовий дорожній) і цифр 90/130, перша і друга з яких пов'язана зі змінами в'язкості (пенетрації).

Пластичність в'язучих бітумів визначають за умовним показником розтяжності (дуктильності); залежить від його групового складу та температури. Чим вища в'язкість, тим менша розтяжність. Значення розтяжності знаходиться в межах 45–70 см за t 25 °С і 3–6,5 за t 0°С. Вищі показники розтяжності свідчать про більший вміст у бітумі смол, нижчі – про значний вміст масел і асфальтенів. Чим більша розтяжність характеризує бітум, тим менша вірогідність появи тріщин на асфальтобетонних покриттях, особливо в зимовий період.

Теплостійкість характеризує зміну властивостей бітуму, що входить до складу асфальтобетонних сумішей під впливом змін температури навколишнього середовища. У літній період за t 50–60 °С бітум знаходиться в рідкоподібному стані і не завжди забезпечує необхідну міцність покриття. За низьких температур до – 30 °С бітум стає крихким і не забезпечує деформаційної стійкості асфальтобетону.

Теплостійкість бітумів складає 0,5–0,6 (Вт/м*к), теплоємність 1,8–1,97 (кДж/кг*К), коефіцієнт об'ємного теплового розширення за t 25 °С знаходиться в межах $5*10^{-4} - 8*10^{-4} \text{ K}^{-1}$.

Температура розм'якшеності характеризує перехід бітуму з в'язкопластичного стану в рідкий. Температура розм'якшеності, як і в'язкість, залежить від вмісту асфальтенів і смол у бітумі.

У більш в'язучих речовин температура розм'якшення вища і навпаки. Визначається на приладі кільця і кульки (КіК) і знаходиться в межах 35–51 °С (для дорожніх в'язучих бітумів).

Температура крихкості – характеризує перехід бітуму з пружно-в'язучого стану в твердий чи крихкий стан за певної температури. Чим нижча температура крихкості, тим в'язуча речовина більш морозостійка і тим менше тріщин утворюється на асфальтобетонному покритті в зимовий період. Її визначають з допомогою приладу Фрааса. Вона знаходиться в межах – 20–25 °С (для дорожніх в'язучих бітумів).

Стабільність властивостей у часі – старіння характеризується погіршенням фізико-механічних властивостей бітуму протягом експлуатації дорожніх покриттів. Старіння бітумів відбувається внаслідок:

- випарювання за підвищення температури легколетких вуглеводородів, які є в маслах;
- зміни хімічного та групового складів бітуму під дією кисню повітря, ультрафіолетових променів та інших факторів;
- порушень структури бітуму внаслідок взаємодії з мінеральними матеріалами в сумішах (зазвичай пористі мінеральні матеріали вбирають значну частину масел);
- перегрівання бітумів внаслідок порушень межі часу та температури технологічного процесу приготування асфальтобетонної суміші.

У результаті цих впливів груповий склад бітуму змінюється: масла переходять у смоли, смоли – у асфальтени. Накопичення асфальтенів призводить до зниження пластичних властивостей і збільшення крихкості бітуму, тому що зменшується кількість смол, які надають бітуму еластичності.

На стабільність властивостей бітуму в асфальтобетоні впливають мінералогічний склад і шорсткість поверхні. У заповнювачах з високоміцних і щільних кам'яних матеріалів з шорсткою поверхнею зерен бітуми менше старіють ніж в асфальтобетоні з пористими заповнювачами, особливо, якщо вони містять оксиди заліза (Fe_2O_3) і алюмінію (Al_2O_3).

Загалом, старіння – це хімічний процес, пов'язаний зі змінами складу та структури бітумів під впливом зовнішніх факторів у процесі експлуатації. Старіння бітумів виявляється у появі тріщин в асфальтобетонному покритті, внаслідок збільшення крихкості бітумних плівок під дією атмосферних факторів, у відділенні рідкої фази від однорідної, гомогенної за фізичним станом бітумної плів-

ки, що відбувається внаслідок розділення в'язучого на дві фази: рідку і гелеподібну. Окрім того, у процесі експлуатації відбувається постійне підвищення міцності бітуму внаслідок збільшення розмірів молекул складових компонентів (полімеризації).

Вимоги до фізико-механічних властивостей бітумів наведені в ДСТУ 4044–2001 Бітуми нафтові дорожні в'язучі і табл. 5.3.

Таблиця 5.3

Фізико-механічні властивості бітумів

Найменування показників	Значення для марок			
	БНД 40/60	БНД 60/90	БНД 90/130	БНД 130/200
1. Глибина проникання голки (пенетрація) за температури 25 °С, м x 10 ⁻⁴ (0,1 мм)	Від 40 до 60	Від 61 до 90	Від 91 до 130	Від 131 до 200
2. Температура розм'якшення за кільцем та кулькою, °С	Від 51 до 57	Від 47 до 53	Від 43 до 49	Від 39 до 45
3. Розтяжність (дуктильність), м x 10 ⁻² (см), не менша:				
3.1. За температури 0 °С	–	3,0	4,0	6,0
3.2. За температури 25 °С	45	55	65	70
4. Зміна властивостей після прогрівання:	0,8	0,8	1,0	1,2
4.1. Зміна маси після прогрівання, %, не більш як				
4.2. Залишкова пенетрація, %, не менш як	60	60	55	50
4.3. Зміна температури розм'якшення, °С, не вища як	6,0	6,0	6,0	7,0
5. Температура крихкості, °С, не вища ніж	–10	–12	–15	–17
6. Температура спалаху, °С, не нижча ніж	240	230	230	220
7. Зчеплення зі склом	Не нормується. Визначення обов'язкове для накопичення даних			
8. Масова частка парафінів, %	Не нормується. Визначення обов'язкове для накопичення даних			
9. Розчинність в органічному розчиннику, %, не менш як	99,00	99,00	99,00	99,00
10. Індекс пенетрації	Від –2, до +1,0			

5.5 Реологічні властивості бітумів

Реологія – це наука про деформації і текучості речовин під дією навантажень у часі, яка розглядає зв'язок між напругами, деформаціями та швидкостями деформацій.

Бітуми є матеріалами, що легко деформуються, зазнаючи значних пластичних деформацій. Головною реологічною властивістю їх є пружність, яка характеризується модулем пружності (E_n).

$$E_n = \frac{\sigma}{\epsilon_0}, \quad (5.6)$$

де σ – діюча напруга; ϵ_0 – пружня деформація; модулем еластичності (E_e)

$$E_e = \frac{\sigma}{\epsilon_m - \epsilon_0}, \quad (5.7)$$

де ϵ_m – повна пружня деформація.

У разі якщо неможливо чітко розрізнити це пружня чи пластична деформація, визначають рівноважний модуль пружності (E_p)

$$E_p = \frac{\sigma}{\epsilon_m}, \quad (5.8)$$

Поверхневий натяг бітумів за температури 20–25 °С складає $(25\text{--}35)10^{11}$ Дж/м².

Фізико-механічні характеристики реологічних властивостей нафтових бітумів отримують шляхом деформування матеріалу за постійного навантаження з наступним розвантаженням.

5.6. Бітуми модифіковані полімерами

Значним недоліком традиційного асфальтобетону є те, що розм'якшення бітумів за підвищення температури влітку та крихкість за зниження взимку разом із нездатністю до зворотних деформацій призводить до утворення на покриттях зсувних деформацій – колій, хвиль, зсувів та тріщин.

Для підвищення міцності на зсув асфальтобетону необхідно забезпечити збільшення когезійної міцності плівки в'язучого матеріалу, що знаходиться між мінеральними зернами. Це можливо завдяки технології отримання бітуму або ефективнішим і сучасним способом – використанням полімерних домішок. Частіш за все використовують термопласти – 75 % (СБС, СБР, СБ, СІС та інші) і термопласти (ЕВА, ЕБА, ЕГМА) – 15 % та інші полімери, наприклад, поліетилен різних тисків (низького, середнього та високого). У цьому разі отримують нову в'язучу речовину – бітум, модифікований полімерами (БМП).

Загальний обсяг бітумів із додаванням полімерів, що використовують у дорожньому й аеродромному будівництвах, складає близько 20 %.

Завдяки використанню термоеластопластів у бітумів підвищується еластичність до 60–90 %, що дозволяє їм працювати в пружній стадії з мінімальною залишковою деформацією, збільшується когезійна міцність та температура розм'якшення. Одночасно покращується низькотемпературна поведінка в'язучої речовини – збільшується розтяжність та penetрація за 0 °С, знижується температура крихкості.

Термопласти збільшують корозійну міцність бітумів. Структура термопластів забезпечує утворення стабільної однорідної структури в'язучого матеріалу, який не розшаровується навіть за тривалого зберігання за робочої температури (150 °С) підвищеної стійкості до окислення та старіння.

Фізико-механічні властивості бітумів нафтових дорожніх різних марок модифікованих термоеластопластом СБС наведені в таблиці 5.4. Модифікацію здійснюють введенням термопласту в мішалку у кількості 2–3% за масою бітуму за температури 175–185 °С і перемішуванням протягом 70–120 хвилин.

Для оцінки якості БМП використовували традиційні показники: penetрацію за 25 °С (P_{25}) і 0 °С (P_0), температуру розм'якшення (T_p), розтяжність за 25 °С (ϵ_{25}), температуру крихкості ($T_{кр}$), корозійну міцність (τ_k).

Властивості БМП різних марок

Найменування в'язучого матеріалу	Показники властивостей						
	P_{25} 1/10 мм	P_0 1/10 мм	$T_p,$ °C	$T_{кр},$ °C	$D_{25},$ см	$\epsilon_{25},$ %	$\tau_k,$ МПа
БНД 40/60	53	26	53	-17	20	-	0,102
БМП (3% СБС)	36	20	66	-17	21	79	0,154
БНД 60/90	75	25	49	-19	42	-	0,079
БМП (3% СБС)	47	26	63	-20	38	82	0,132
БНД 90/130	96	33	47	-21	68	-	0,044
БМП (3% СБС)	53	27	63	-21	69	86	0,105
БНД 90/130	145	41	43	-23	67	-	0,036
БМП (3% СБС)	70	34	59	-24	84	93	0,080
Примітка. Як приклад, наведена модифікація термопластом СБС							

Термоеластоласти та термоласти в Україні використовують закордонного виробництва, що значно збільшує вартість модифікованого бітуму (у 1,5–2 рази порівняно з вихідним бітумом).

Тому широке застосування цих модифікаторів стримується їх вартістю.

В Україні на сьогодні немає вітчизняного ефективного та недорогого полімерного модифікатора бітуму. Здійснені останніми роками дослідження довели можливість використання з цією метою поліетилену.

Поліетилен – полімер, який порівняно з полістиролом і полівінілхлоридом набрякає, розчиняється в бітумі та суміщується з ним упродовж перемішування.

Поліетилен – твердий полімер білого кольору, має формулу $(-CH_2-CH_2-)_n$, конформація карбонового ланцюга – пласткий зигзаг. У промислових умовах поліетилен отримують з етилену $CH_2=CH_2$:

- полімеризацією за радикальним механізмом за високого тиску, отримують поліетилен високого тиску або низької густини (P_{BT});
- за іоннокординаційним механізмом на каталізаторах Циглера за низького тиску з отриманням поліетилену низького тиску (P_{HT});
- за іонним механізмом на металоокислених каталізаторах за середнього тиску з отриманням поліетилену середнього тиску (P_{CT}).

Фізико-механічні властивості поліетиленів наведені в табл. 5.5.

Таблиця 5.5

Фізико-механічні властивості поліетиленів різних типів

Показники	Поліетилен		
	високого тиску (P_{BT})	низького тиску (P_{HT})	середнього тиску (P_{CT})
Молекулярна маса	18000–35000	50000–80000	50000–500000
Кількість відгалужень на 1000 атомів вуглецю	20–50	5–15	3–15
Густина, г/см ³	0,92–0,93	0,94–0,96	0,96–0,97
Рівень кристалічності, %	55–70	80–90	85–90
Температура плавлення, °C	105–110	120–130	128–130
Температура крихкості, °C	Мінус 120 – мінус 80	Мінус 150– мінус 70	Мінус 140– мінус 70
Водопоглинання за 30 діб за 20 C, %	0,040	0,030–0,040	0,005
Межа міцності на розтяг, кг/см ²	120–160	220–280	270–340
Відносне подовження до розриву, %	150–600	200–900	100–700

Набрякання та розчинення поліетилену зростає зі зменшенням густини та молекулярної маси. Виходячи з цього, краще з бітумами суміщується поліетилен високого тиску (P_{BT}).

Суміщення (P_{BT}) з бітумом можливе у разі нагрівання суміші до температури 280–300 °C унаслідок часткової деструкції або за значно нижчих температур (близько 200 °C) за умови введення пластифікаторів. Дозування пластифікаторів необхідне у зв'язку з нестачею в бітумі парафінонафтенових вуглеводнів, здатних пластифікувати або розчиняти поліетилен. Існують дві думки щодо того, яким повинен бути склад пластифікатора. За однією пластифікатори повинні вмішувати переважно парафінонафтенові вуглеводні, у яких краще розчиняється P_{BT} . За другою – нафтенароматичні та ароматичні вуглеводні, які забезпечують не тільки розчинення P_{BT} , але й краще його суміщення з бітумом.

Уведення P_{BT} у бітум поліпшує фізико-механічні властивості в'язучого матеріалу високих температур і практично не впливає на його поведінку за низьких.

Використання $P_{\text{вт}}$ у асфальтобетонних сумішах сприяє зростанню модуля жорсткості та зменшенню термочутливості сумішей, що дозволяє підвищити зсувостійкість верхнього шару – покриття.

Для модифікації бітумів можна використати відходи $P_{\text{вт}}$. У разі аналогічного впливу на властивості бітуму та асфальтобетону, вони набагато дешевші та краще сумішуються внаслідок деструкції, яка відбувається впродовж експлуатації виробів з $P_{\text{вт}}$.

Дослідження, виконані у Варшавському технологічному університеті, довели можливість отримання однорідної суміші бітуму зі значним вмістом нафтових компонентів та відходів $P_{\text{вт}}$ за температури суміщення 220 °С. Показано, що введення 2% відходів поліетилену призводить до підвищення температури розм'якшення бітумів на 20 %.

У Франції відходи поліетилену додають до асфальтобетону у кількості 0,4–1,0 % від маси мінеральної частини з метою армування суміші та підвищення в'язкості в'язучого матеріалу, та заповнення пустот мінерального остову. Як структурні домішки відходи поліетилену збільшують жорсткість та знижують термочутливість асфальтобетону за високих температур, таким чином підвищуючи зсувостійкість покриттів.

У Національному університеті «Львівська політехніка» запропонували технологію отримання будівельних бітумів шляхом окислення суміші гудрону з відходами поліетилену.

Недоліками відходів $P_{\text{вт}}$ є їх неоднорідність та забрудненість, що потребує попередньої підготовки: сортування, миття, подрібнення (агломерації) тощо.

Більш придатний для модифікації так званий «вторинний поліетилен» ($P_{\text{в}}$).

Вторинний поліетилен ($P_{\text{в}}$) – продукт перероблення відходів виробів з $P_{\text{вт}}$, сільськогосподарської плівки, плівкової тари, оболонки телефонного кабелю, і водночас він є сировиною для повторного виготовлення продукції.

Під час перероблення відходи $P_{\text{вт}}$ підлягають додатковому термоокислювальному та механохімічному впливам, що призводить до локальних розривів полімерних ланцюгів та зростання їх активності. Як результат, вторинний поліетилен ($P_{\text{в}}$) краще сполучається з бітумом, ніж необроблені відходи $P_{\text{вт}}$. Вторинний поліетилен ($P_{\text{в}}$)

має вигляд крихт розміром 2–15 мм або гранул розміром 2–6 мм, що робить його більш технологічним, ніж відходи П_{вт}.

Вторинний поліетилен (П_в) може використовуватись як армувальна домішка до гарячої асфальтобетонної суміші. Уведення 2–3 % армувальних волокон довжиною 5–40 мм і діаметром 0,5–3,0 мм збільшує міцність асфальтобетону на стиск за 20 °С на 20 % і за 50 °С – на 35 %.

Оптимальний вміст вторинного поліетилену (П_в) для асфальтобетону на основі бітуму марки БНД 90/130 (гарячого дрібнозернистого) становить 0,8–1,5 % від маси мінеральної частини. При цьому міцність на стиск збільшується на 25–30 % за 20 °С та на 30–35 % за 50 °С.

5.7. Особливості взаємодії бітумів з мінеральними матеріалами

Фізико-хімічна взаємодія нафтових бітумів з мінеральними матеріалами, головним чином, зводиться до забезпечення достатнього прилипання (адгезії) плівки в'язучого матеріалу до поверхні зерен і залежить перш за все від міри змочування цієї поверхні в'язучим матеріалом.

Величина змочування бітумом поверхні кам'яного матеріалу залежить від крайового кута (кута змочування (θ)). Якщо крайовий кут гострий, то змочування достатнє, оскільки притяжіння молекул рідини до поверхні мінерального матеріалу (адгезія) наближається до внутрішнього притяжіння молекул рідини (когезія). Якщо крайовий кут тупий, змочування погане, за притяжіння молекул рідини мінеральним матеріалом слабке.

Загалом, поверхня змочується за $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$ і не змочується за $90^\circ < \theta < 180^\circ$.

Залежність змочування поверхні від кута змочування наведена на рис. 5.1.

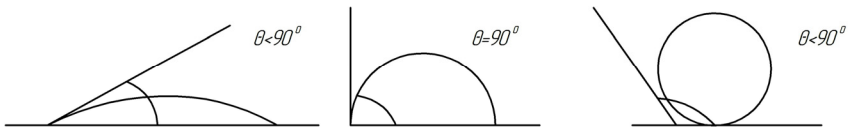


Рис. 5.1. Змочування або швидкість встановлення міжфазного контакту залежно від кута змочування θ

У разі змочування бітумом поверхні мінерального матеріалу, відбувається формування міжфазного контакту, який визначає площа контактів двох фаз – фактичною (S_n) і максимальною (мономолекулярною) (S_m). Досягненню (S_m) перешкоджає розвиненість мікрорельєфу кам'яної поверхні та опір межових з нею шарів бітуму.

Величина кута змочування (θ) залежить від значень питомої вільної поверхневої енергії – поверхневого натягу трьох поверхонь розділу: бітум–повітря ($\sigma_{\text{бп}}$), бітум–мінеральний матеріал ($\sigma_{\text{бм}}$) та повітря–мінеральний матеріал ($\sigma_{\text{пм}}$).

Ця залежність підпорядковується закону Лапласа-Неймана:

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{\text{пм}} - \sigma_{\text{бм}}}{\sigma_{\text{бп}}}. \quad (5.9)$$

Зв'язок між кутом змочування (θ) та поверхневим натягом бітуму ($\sigma_{\text{бп}}$) можна описати рівнянням Юнга через так звану «термодинамічну роботу адгезії» (W_a) (вільну енергію рівноважно розподілу фаз на нескінченно великій відстані):

$$W_a = \sigma_{\text{бп}}(1 + \cos \theta). \quad (5.10)$$

З рівняння (5.10) видно, що у разі повного змочування (S_m) (за $\theta=0$) робота адгезії буде максимально можливою, $W_a = 2\sigma_{\text{бп}}$. За відсутності змочування ($\theta=180^\circ$) адгезії бітуму до щебеню не спостерігається $W_a = 0$.

Міра розтікання бітуму поверхнею, окрім міжфазних властивостей, залежить також від його когезійних характеристик, перш за все від так званої «роботи когезії» (W_k): $W_k = 2\sigma_{\text{бп}}$. За $W_a - W_k \geq 0$ спостерігається повне змочування.

За здатністю змочуватись водою речовини поділяють на гідрофільні – оксиди, карбонати, силікати, слюду, кварц та гідрофобні – сірку, графіт, тальк, сульфіди, жири, парафіни, бітуми.

Після змочування внаслідок контакту бітуму з мінеральною поверхнею відбуваються процеси електростатичної взаємодії (зокрема утворення міжфазного подвійного електричного шару), а також адсорбції.

Молекулярно-кінетичною передумовою утворення адгезійного зв'язку є забезпечення достатньо високої рухомості молекул бітуму на межі розподілу фаз. За наближення значень поверхневої енергії міжфазової межі (поверхневого натягу) ($\sigma_{\text{ом}}$) до 0 зростання рухливості макромолекул забезпечує сумісність обох фаз у зоні контакту, аж до межового випадку, коли можлива взаємна дифузія з переміщенням окремих елементів через межу розподілу фаз.

Характер та інтенсивність цих процесів, а відтак і міцність зв'язку між бітумом та кам'яним матеріалом, залежать від таких факторів, як активність та в'язкість бітуму, активність та хіміко-мінералогічний склад кам'яного матеріалу, шорсткість, вологість, чистота та розмір зерен мінерального матеріалу, а також температури нагрівання бітуму та мінерального матеріалу.

Активність бітуму визначає міра ароматичності його складових, ненасиченість хімічних зв'язків та наявність кисневих, сірчастих, азотовмісних сполук.

В'язкість бітуму гальмує відшаровування плівки в'язучої речовини від мінеральної поверхні під дією води, і чим більш в'язучий бітум, тим важче його відшарувати. З іншого боку, чим більша в'язкість бітуму, тим важче забезпечити адгезійний контакт з кам'яним матеріалом за тих самих температурних умов внаслідок погіршення змочування поверхні.

Активність мінерального матеріалу визначає наявність на поверхні адсорбційних центрів певного заряду, через які здійснюється контактна взаємодія між бітумом і кам'яним матеріалом. На практиці поверхня кам'яних матеріалів має як позитивно, так і негативно заряджені активні зони, кожна з яких адсорбує свій певний вид полярних груп. Загальний заряд поверхні вважають позитивним або негативним залежно від того, які активні зони переважають. Поверхня основних порід (вапняків, доломітів, мармуру), що містять оксиди лужноземельних і важких металів, має загальний позитивний заряд, а кислих з переважним вмістом кремнезему SiO_2 (гранітів, сієнітів, пісковиків, кварцитів та ін.) – негативний.

Належність мінерального матеріалу до того чи іншого типу гірської породи визначають за вмістом оксиду кремнію (SiO_2). Залежність між вмістом SiO_2 та типом гірської породи наведена в табл. 5.6.

Таблиця 5.6

**Класифікація гірських порід залежно
від вмісту оксиду кремнію SiO₂**

Тип гірської породи	Вміст SiO ₂ , %
Ультракисла	Більший за 85
Кисла	65–85
Середньо кисла	50–65
Основна	40–50
Ультраосновна	Менший як 40

Наявність у бітумі поверхнево-активних речовин (ПАР) переважно аніонного типу, забезпечує його міцне зчеплення з мінеральним матеріалом основних порід завдяки електростатичному притягненню та хімічній адсорбції між негативно зарядженими сполуками в'язучого матеріалу та позитивно зарядженою поверхнею активних зон мінералів. У результаті хімічних реакцій у зоні контакту утворюються стійкі водонерозчинні сполуки. Вміст SiO₂ у деяких гірських породах, що найбільше використовують у дорожньому й аеродромному будівництві наведеній на рис. 5.2.

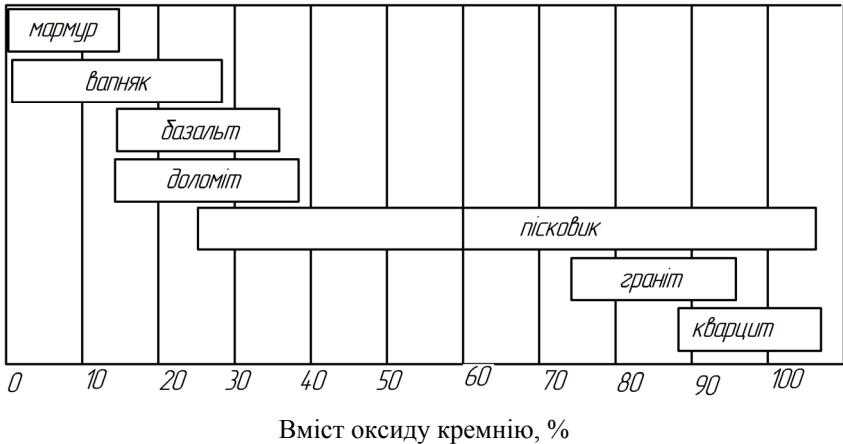
Вміст SiO₂ у деяких гірських породах

Рис. 5.2. Вміст оксиду кремнію (SiO₂) у кам'яних матеріалах різної природи

Унаслідок взаємодії бітуму з кислими породами, поверхня яких має одноіменний з ним заряд, спостерігається лише фізична адсорбція, і плівка бітуму легко відшаровується під дією води та транспортних навантажень.

Через гідрофільну природу більшості мінеральних матеріалів та гідрофобної природи нафтових бітумів останні, зазвичай, нездатні прилипати до вологих мінеральних матеріалів. Відсутня початкова стадія адгезії – змочування бітумом вологої поверхні. Унаслідок незначного вмісту ПАР бітум нездатний витіснити воду з поверхні вологих чи погано висушених мінеральних матеріалів.

На формування адгезійного контакту впливає шорсткість твердої поверхні. Чим більша шорсткість, тим гірші умови змочування. Але якщо поверхня вже вкрита бітумом, то змістити плівку в'язучого матеріалу з шорсткої поверхні важче, ніж з гладкої.

Для хімічної адсорбції найбільш активними ділянками на поверхні є кути та ребра мінеральних матеріалів, для фізичної адсорбції – заглиблення, ями, щілини. Зі зменшенням розміру мінеральних частинок та збільшенням їх питомої поверхні зростає кількість активних зон, що підвищує і загальну адгезійну активність матеріалів.

Адгезія бітуму залежить від виду пилу, яким вкритий щебінь. Якщо поверхня мінерального матеріалу вкрита вапняковим чи базальтовим пилом, то адгезія бітуму покращується, якщо глиною або гранітним пилом – погіршується.

Бітум – термопластичний матеріал. Тому нагрівання підвищує зчеплення бітуму з мінеральними матеріалами завдяки зниженню його в'язкості, поліпшенню змочування, а також більш інтенсивному перебігу фізико-хімічних процесів у зоні контакту.

Нагрівання кам'яного матеріалу забезпечує зневоднення його поверхні, внаслідок якого відбувається втрата вільної чи частково зв'язаної води, а також підтримання необхідної температури бітуму під час процесу змочування.

Таким чином, адгезія органічного в'язучого матеріалу – нафтового бітуму – до поверхні кам'яних матеріалів виникає внаслідок хемосорбційних процесів, які необхідно активізувати.

5.8. Вплив поверхнево-активних речовин на процес взаємодії бітуму з кам'яними матеріалами

Змочування бітумом поверхні кам'яних матеріалів та адгезію до цієї поверхні можна значно поліпшити застосуванням поверхнево-активних речовин (ПАР).

Молекули ПАР складаються з двох головних частин: неполярної – радикала та полярної – функціональної групи.

Унаслідок введення в бітум молекули ПАР адсорбуються на поверхні розділу фаз та орієнтуються неполярною частиною в бітум, а полярною – назовні. Катіонактивні ПАР утворюють на поверхні бітуму позитивно заряджений адсорбційний шар, аніонактивні – негативно заряджений.

Завдяки поляризації поверхні бітуму поліпшуються процеси змочування. ПАР витісняють воду та сприяють рівномірному розподілу в'язучої речовини по поверхні мінерального матеріалу. Навіть на мокрій мінеральній поверхні бітум у присутності ПАР розподіляється у вигляді плівки, тоді як без ПАР він збирається в краплі.

У результаті контакту бітуму з поверхнею мінеральних матеріалів молекули ПАР притягуються та адсорбуються протилежно зарядженими активними центрами мінералів і вступають з ними в хімічну реакцію, утворюючи водонерозчинні сполуки (хемосорбційні сполуки типу мил). Завдяки цьому забезпечується міцний зв'язок між бітумом та мінеральним матеріалом.

Загалом, поверхнево-активні речовини (ПАР) застосовують:

- за використання неактивних бітумів – для підвищення зчеплення з мінеральними матеріалами основних та кислих порід;
- за використання активних бітумів – для поліпшення зчеплення до мінеральних матеріалів кислих та ультракислих порід (граніти, кварцити, сієніти тощо);
- у роботі з вологими мінеральними матеріалами.

ПАР аніонного типу застосовують для підсилення прилипання бітуму до мінеральних матеріалів основних порід (у разі недостатнього вмісту у бітумі аніонактивних речовин), а також кислих порід за умов попередньої активації мінеральної поверхні вапном або цементом. Вміст аніонактивних домішок складає 3–10 % від

маси бітуму, активаторів 1–3 % від маси мінерального матеріалу. Як аніонактивні домішки застосовують високомолекулярні органічні кислоти та їх солі, а також речовини, що їх містять: кубові залишки синтетичних жирних кислот, окислений петролатум, сапсток, деревні смоли тощо.

Найбільш ефективним способом підвищення зчеплення бітумів з мінеральним матеріалом є застосування катіонактивних ПАР. Це такі речовини, як: аліфатичні (жирні) аміни, амідоміни або їх солі, а також четвертинні амонієві основи.

Катіонактивні ПАР значно покращують зчеплення бітуму зі щебенем як кислих, так і основних порід, утворюючи на межі розподілу в першому випадку хемосорбційні сполуки типу силікатамінів, у другому – карбонтамінів. Вони поліпшують технологічні властивості приготування та укладання асфальтобетонних сумішей, прискорюють формування дорожніх покриттів, що облаштовують малов'язкими бітумами та бітумними емульсіями, уповільнюють процес старіння бітумів, покращують експлуатаційні характеристики та довговічність нежорстких дорожніх одягів.

В Україні та закордоном виробляють значну кількість адгезійних домішок – катіонактивних ПАР, найбільш ефективними з них є такі: АЗМОЛ, БП-3 (виробництва Україна), а також закордонних: POLIRAM L200, SECABASE 260, DOPE MP-2 (фірма SECA, Франція); Wetfix 559, Wetfix BE, Diamine OLB (фірма AKZO NOBEL, Швеція); TERAMIN 14 (фірма ISCO Chemical Production, Польща).

Згідно з ДСТУ Б В.2.7–81 та ДСТУ Б В.2.7–89 показник зчеплення (адгезії) визначають двома методами. За першим методом його визначають за частиною площі скла (у відсотках), на якій зберігся бітум після витримування скляної пластини у воді за температури 85 °С. За другим – за п'ятибальною шкалою – залежно від площі, що залишилась вкритою бітумною плівкою після кіп'ятіння щебінок фракції 20–40 мм у дистильованій воді протягом 30 хв.

Для порівняння результатів, отриманих за двома методами випробувань, використовують шкалу співвідношення між частиною мінеральної поверхні, вкритої бітумом (у відсотках, та балами з кроком 0,5 бали (табл. 5.7)).

Таблиця 5.7

Співвідношення між балами та відсотками площі мінеральної поверхні, що залишилась вкритою бітумом після кіп'ятіння

Показник зчеплення бітумів з мінеральним матеріалом	
Бали	% площі
2	не більш ніж 30
2,5	31–50
3	51–65
3,5	66–75
4	76–85
4,5	86–95
5	96–100

Результати випробувань адгезії вищезазначених домішок представлені в таблицях 5.8 та 5.9.

Таблиця 5.8

Значення показників зчеплення бітумів, модифікованих різними адгезійними домішками, з поверхнею гранітного щебеню (в балах)

Назва домішки	Вміст домішки, %				
	0	0,3	0,5	0,8	1,0
Wetfix 559	3	4,5	5	5	5
Wetfix BE	3	4,5	5	5	5
Diamine OLB	3	4	5	5	5
POLIRAM L200	3	4	5	5	5
DOPE MP-2	3	4,5	5	5	5
SECABASE 260	3	4	4,5	5	5
TERAMIN 14	3	4	5	5	5
АЗМОЛ БП -3	3	3	4	4,5	5

Таблиця 5.9

Значення показників зчеплення бітумів, модифікованих різними адгезійними домішками, з поверхнею скла (у відсотках)

Назва домішки	Вміст домішки, %				
	0	0,3	0,5	0,8	1,0
Wetfix 559	35	66	82	100	100
Wetfix BE	35	69	83	100	100
Diamine OLB	35	65	80	100	100
POLIRAM L200	35	61	75	100	100
DOPE MP-2	35	54	72	100	100
SECABASE 260	35	67	82	100	100
TERAMIN 14	35	58	74	96	100
АЗМОЛ БП -3	35	44	62	80	92

Дослідження впливу адгезійних домішок на інші фізико-механічні характеристики бітуму показали, що більшість домішок за оптимального вмісту майже не впливають на їх покращення, але домішка Wetfix 559 має структурувальну дію. Унаслідок уведення 0,5 % Wetfix 559 на 10 % знижується пенетрація бітуму за 25 °С, на 2 °С підвищується температура розм'якшеності, дещо зменшується розтяжність. АЗМОЛ БП-3 навпаки, пластифікує бітум: відповідно зростає пенетрація, знижується температура розм'якшеності, поліпшуються низькотемпературні характеристики.

Результати випробувань вихідного бітуму та бітумів, модифікованих найбільш характерними адгезійними домішками, наведені в табл. 5.10.

Таблиця 5.10

Фізико-механічні властивості бітумів, модифікованих різними адгезійними домішками

В'яжучий матеріал	Показники				
	Пенетрація, 0,1 мм		Температура розм'якшеності	Розтяжність, см	
	за 25 °С	за 0 °С		за 25 °С	за 0 °С
Бітум БНД 90/130	100	28	45,0	90	5,2
Бітум БНД 90/130 +0,5 % Wetfix BE	98	27	45,5	90	5,0
Бітум БНД 90/130 +0,5 % Wetfix 559	88	24	47,0	86	4,6
Бітум БНД 90/130 +0,5 % SECABASE 260	96	26	45,0	88	4,8
Бітум БНД 90/130+ 1 % АЗМОЛ БП -3	110	30	43,5	90	6,0

Таким чином, унаслідок додавання в бітум поверхнево-активних речовин покращується присипання (адгезія) його до кам'яного матеріалу. Глибина цього процесу та якість зв'язку в'яжучого з поверхнею кам'яного матеріалу залежить від структури і властивостей ПАР, бітуму та мінерального матеріалу.

5.9. Дьогтеві в'яжучі речовини

Дьогтеві в'яжучі речовини – дьогті являють собою в'яжучу рідину чорного кольору з характерним запахом. Вони складаються з вуглеводів і їх сірчаних, азотних і кисневих похідних, отриманих конденсацією породоутворювальних продуктів, які виникають за розкладання органічних матеріалів в умовах високої температури без доступу повітря.

Дьогті за структурою є гомогенною системою, у якій тверді дисперговані частки (дьогтьові смоли та вільний вуглевод) наче розчинені в дьогтьових маслах.

Унаслідок випаровування легких низькокіп'ячих вуглеводів поступово відбувається старіння дьогтю, зумовлене також і тим, що багато сполук у складі є ненасиченими, тобто легко змінюють свій склад упродовж хімічних процесів під впливом зовнішнього середовища в процесі експлуатації.

За вихідною сировиною дьогті поділяють на кам'яновугільні, торф'яні, деревинні та сланцеві. Залежно від методу перероблення сировини на коксі та газі. За технологією отримання кам'яновугільні дьогті поділяють на: сирі, відогнені та складені.

Кам'яновугільний дьоготь – найбільш широко використовуванний. Сирий кам'яновугільний дьоготь, який залежно від сировини – смоли, що отримують упродовж сухої деструкції кам'яного вугілля буває двох типів:

- низькотемпературний, який отримують унаслідок напівкоксування, яке закінчується за температури 450–600 °С. Має щільність 850–1100 кг/м³;

- високотемпературний, який отримують унаслідок коксування, яке закінчується за температури 1000–1300 °С. Має щільність 1120–1280 кг/м³ і температуру розм'якшення 40–70 °С.

Низькотемпературний дьоготь за хімічним складом відрізняється від високотемпературного і є сумішшю парафіністих, і нафтових вуглеводнів і фенолів та непридатний для використання в дорожньому будівництві.

Високотемпературний дьоготь складається з таких компонентів: вода – 2–3 %, легкі масла 1–7 %, середні масла – 8–12 %, важкі масла – 5–8%, залишок після перегонення 55–70 %, вільного вуглеводу – 0–8 %, нафталіну – 0–2 %, фенолів до 30 %, твердих парафінів – 3–15 %.

Відігнаний кам'яновугільний дьоготь отримують фракціонуванням сирової низькотемпературної смоли з виділенням з неї лігроїнової і газової фракцій. За своїми властивостями він близький до високотемпературного дьогтю.

За високотемпературної деструкції з 1 т вугілля отримують 700–750 кг коксу, 300–350 м³ газу, 12–15 т бензолу, до 3 кг аміаку і 30–40 кг сирової кам'яновугільної високотемпературної смоли. Залишковим продуктом перегонення цієї смоли є кам'яновугільний пек – продукт чорного кольору щільністю 1200–1280 кг/м³. Пек являє собою сумішшю висококонденсованих карбо- і гетероциклічних сполук, продуктів ущільнення, які відрізняються рівнем ароматичності і вмістом вільного вуглеводу (8–30 %). Пек разом з антрацитовим маслом використовують для виробництва складеного кам'яновугільного дьогтю.

Торф'яний дьоготь отримують у спеціальних генераторах або коксовальних печах. Він належить до типу низькотемпературних смол та утримує в своєму складі близько 10–15 % фенолу та твердого парафіну (близько 10 %). Щільність його складає 1030–1050 кг/м³. Має значно меншу тепло- й атмосферостійкість ніж кам'яновугільний дьоготь і кращу адгезію до кам'яного матеріалу завдяки більшій полярності.

Деревинний дьоготь виготовляють із деревинних низькотемпературних смол, які отримують унаслідок згоряння хвойних і листвяних порід у газогенераторних установках.

За зовнішнім виглядом сира деревинна газогенераторна смола – густа рідина темно-коричневого кольору, що містить значну кількість фенолів, оцтової кислоти і води. Характеризується значною адгезією до кам'яного матеріалу

Сланцевий дьоготь отримують шляхом окислення (продування) важких низькотемпературних сланцевих смол з різною температурою розм'якшеності. У сланцевих дьогтях у порівняно зі сланцевими бітумами, значно менше масел і більше смол.

У дорожній галузі в основному використовують кам'яновугільні дьогті.

За результатами роботи українських вчених визначено, що кам'яновугільні дьогті високо- і низькотемпературні можна використовувати як в'язучу речовину для приготування щільних чорно-щебених сумішей, та дьогтебетону.

Використання цих матеріалів у одношарових покриття або верхньому шарі двошарового покриття обов'язково до складу сумішей уводять бітум марок БНД 60/90 або БНД 90/130 у кількості 15–25 % за масою або одразу після влаштування дьогтевих покриттів виконати поверхнєве оброблення з використанням бітуму для підвищення довговічності шару дорожнього одягу.

Покращення експлуатаційних властивостей дьогтів можна досягти, збільшивши введення до складу сумішей різних мінеральних (дисперсних) наповнювачів (наприклад, цементного пилу, вапняку, шлакового порошку), тощо кількістю 25–30 % за масою. Але загалом дьогтеві суміші мають значно нижчу довговічність ніж бітумні. У дорожньому й аеродромному будівництвах нині практично не використовують у верхніх шарах і в окремих випадках (де дьоготь є місцевим матеріалом) у нижніх шарах дорожнього одягу.

Питання для самоконтролю



1. Схарактеризуйте органічні в'язучі речовини.
2. Які існують види бітумних в'язучих речовин?
3. Які елементи входять до хімічного складу бітумів?
4. Назвіть фізико-механічні властивості бітумів
5. Які матеріали використовують для модифікації бітумів?
6. Схарактеризуйте взаємодію бітумів з мінеральними матеріалами.
7. Що таке дьогтеві в'язучі речовини і яких видів вони бувають?

Розділ 6. ЕМУЛЬСІЇ БІТУМНІ ДОРОЖНІ, ЇХ СТРУКТУРА ТА ВЛАСТИВОСТІ

Емульсії бітумні дорожні – це дисперсні системи, що складаються з двох рідин (бітуму та води), не змішуються між собою, а навпаки, одна рідина диспергується в другій. Стійкості емульсій досягають уведенням до її складу емульгаторів – поверхнево-активних речовин (ПАР) або тонко-дисперсних порошоків, які з одного боку знижують поверхневий натяг між бітумом і водою, а з другого – надають часткам бітуму певного заряду, який попереджає їх злипання.

Емульгатори можуть бути:

– аніонними – мила, лужні солі нафтових, сульфонафтових і смоляних органічних кислот, сульфітно-спиртова барда, мило-нафт і т.ін.;

– катіонними – катіонові мила, що є похідними від четвертично заміщеного амонію і смол амінів, карбоксиламінів (ПАР-карбоксиламін був розроблений в Україні М. І. Кучмою, Т. Ю. Химерик).

Залежно від типу емульгатора згідно з ДСТУ Б В.2.7–129:2013 Емульсії бітумні дорожні. Технічні умови, емульсії поділяють на такі види:

– емульсія бітумна аніонна дорожня являє собою рідину, яку отримують шляхом диспергування бітуму у водному розчині аніонного емульгатора в присутності лугу. До її складу можуть входити полімерні, адгезійні та інші модифікувальні домішки, це так звана «лужна емульсія»;

– емульсія бітумна катіонна дорожня рідина, яку отримують шляхом диспергування бітуму у водному розчині катіонного емульгатора в присутності кислоти. До її складу можуть входити полімери, адгезійні та інші модифікувальні домішки, це так звана «кисла емульсія».

6.1. Класифікація емульсій бітумних дорожніх

Емульсії бітумні дорожні згідно з ДСТУ Б В.2.7–129:2013 класифікують за такими ознаками:

1. За знаком заряду емульгатора їх поділяють на класи:
 - катіонні (ЕК);

- аніонні (ЕА).
- 2. За наявністю модифікатора у складі емульсії:
 - немодифіковані;
 - модифіковані (М).
- 3. За змішуваністю з мінеральним матеріалом (за швидкістю розпаду) на такі види:
 - швидкорозпадні (Ш) – емульсії, які не змішуються з мінеральним матеріалом, або має індекс розпаду від 50 % до 120 %. Індекс розпаду – це кількість еталонного мінерального наповнювача, що призводить до розпаду (коагуляції) одиниці маси катіонної емульсії;
 - середньорозпадні (С) – емульсії, що змішуються з мінеральними сумішами пористого складу, або мають індекс розпаду від 120 % до 170 %;
 - повільнорозпадні (П) – емульсії, що змішуються з мінеральними сумішами щільного або пористого складу, або мають індекс розпаду від 170 % до 230 %.

Кожний вид емульсії поділяють на марки залежно від вмісту бітуму:

- від 38-ми % до 47-ми % (ЕКШ-40, ЕКШМ-40);
- від 48-ми % до 52-х % (ЕКШ-50, ЕКШМ-50, ЕАШ-50, ЕАШМ-50, ЕАС-50, ЕАСМ-50, ЕАП-50, ЕАПМ-50);
- від 53-х % до 57-ми % (ЕКШ-55, ЕКШМ-55, ЕКС-55, ЕКСМ-55, ЕКП-55, ЕКПМ-55);
- від 58-ми % до 62-х % (ЕКШ-60, ЕКШМ-60, ЕКС-60, ЕКСМ-60, ЕКП-60, ЕКПМ-60, ЕАШ-60, ЕАШМ-60, ЕАС-60, ЕАСМ-60, ЕАП-60, ЕАПМ-60);
- від 63-х % до 67-ми % (ЕКШ-65, ЕКШМ-65, ЕКС-65, ЕКСМ-65, ЕКП-65, ЕКПМ-65);
- від 68-ми % до 71-го % (ЕКШ-70, ЕКШМ-70, ЕАШ-70, ЕАШМ-70, ЕАС-70, ЕАСМ-70, ЕАП-70, ЕАПМ-70);

Умовне позначення емульсії складається зі скороченого позначення емульсії бітумної, індексу та реєстраційного номера ДСТУ, наприклад: емульсія катіонна дорожня немодифікована швидкорозпадна з вмістом в'язучої речовини від 48 % до 67 %:

ЕКШ-50 ДСТУ Б В.2.7-129:2013

емульсія аніонна дорожня модифікована середньорозпадна із вмістом в'язучої речовини від 58-ми % до 62-х %:

ЕАСМ-60 ДСТУ Б В.2.7-129:2013

За структурою емульсії бітумні дорожні поділяють на два типи: прямі та зворотні.

У прямих емульсіях бітум рівномірно розподілений у воді у вигляді дрібних крапель $(1 \cdot 10)^{-6}$, оточених шаром емульгатора, наприклад, водорозчинним милом жирної синтетичної кислоти.

У зворотніх емульсіях вода рівномірно розподілена в бітумі у вигляді найдрібніших крапель, стабілізованих, наприклад, водонерозчинним кальцієвим милом жирної синтетичної кислоти.

У дорожньому й аеродромному будівництвах використовують прямі емульсії.

За агрегативною стійкістю емульсії поділяють на дві групи:

– розріджені, у яких концентрація дисперсної фази (крапель бітуму) дуже незначна (близько 1 %);

– концентровані, у яких концентрація дисперсної фази (крапель бітуму) вища ніж 1 %.

Емульсії, у яких вміст дисперсної фази перевищує 74 % за об'ємом називають *висококонцентрованими*. Особливістю таких емульсій є те, що у них відбувається взаємне деформування крапель дисперсної фази, у результаті чого вони набувають форми багатогранників (поліефірів), розділених тонкими плівками – прошарками дисперсійного середовища.

6.2. Структура емульсій бітумних дорожніх

В емульсіях бітумних дорожніх бітум є дисперсною фазою, він рівномірно розподілений (диспергований) у дисперсійному середовищі (воді) у вигляді дрібних часток розміром $(1 \cdot 10)^{-6}$ м, які вкриті шаром рідкого емульгатора. Поверхнево-активні речовини (ПАР), молекули яких складаються з полярної і неполярної часток, орієнтуються на межі розділу бітум-вода таким чином, що неполярною часткою вони звернені до бітуму, а полярною – до води.

Внаслідок такої орієнтації ПАР утворюється шар, який вирівнює різницю полярностей бітуму (фази) і води (середовища), і знижує поверхневий натяг на межі їх розділу.

За рахунок дисоціації полярної групи ПАР частки дисперсної фази отримують електричний заряд: за наявності аніонного емульгатора – від'ємний, катіонного – позитивний. Одноіменно заряджені частки дисперсної фази відштовхуються, що попереджає їх злипання і зумовлює стійкість емульсії. Тверді емульгатори як

мінерального, так і органічного походження прилипають до поверхні диспергованих часток бітуму й утворюють на межі розділу з водою захисні оболонки, що перешкоджають їх з'єднанню.

Структура бітумної емульсії наведена на рис. 6.1.

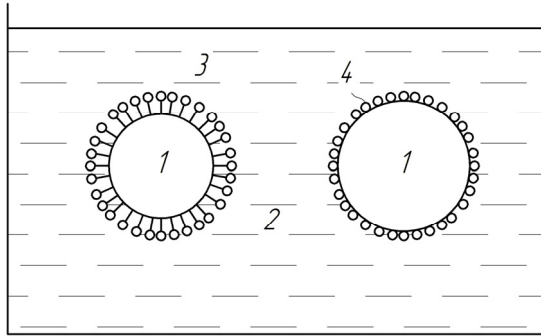


Рис. 6.1 Структура бітумної емульсії: *a* – на органічному емульгаторі; *б* – на порошкоподібному емульгаторі; 1 – бітумна крапля (фаза); 2 – вода (середовище); 3 – органічний емульгатор; 4 – порошкоподібний емульгатор

Стабілізаційна дія ПАР досягає максимуму близько насичення, а потім стрімко зменшується на межі повністю насичених шарів. Це відбувається внаслідок того, що для повної стабілізації необхідно досягти високої структурної в'язкості (міцності) бітумної плівки, яка сприяє уповільненню зменшення товщини прошарку, заповненого дисперсійним середовищем між краплями або частками, що зближуються, і необхідно, щоб легкорухливий адсорбційний шар у разі випадкового розриву зміг швидко затягтися, інакше утворюються розриви, що призводять до зниження стабільності емульсії. Схема будови міцели дисперсної фази у емульсіях з аніонактивними та катіонактивними емульгаторами наведена на рис. 6.2.

Основна різниця між аніонними та катіонними емульсіями визначається взаємодією з оброблюваним мінеральним матеріалом.

Так, аніонні емульсії активно взаємодіють з основними гірськими породами, які містять СаО і MgO з утворенням на поверхні водостійкої плівки. З кислотними гірськими породами, що містять SiO₂ аніонні бітумні емульсії взаємодіють неактивно, плівка органічного в'язучого матеріалу на них нестійка.

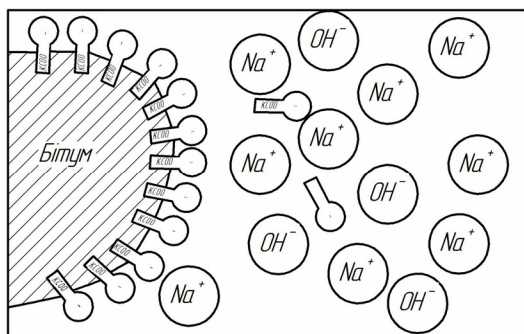


Схема розташування подвійного електричного шару в емульсіях з аніонактивним емульгатором

a

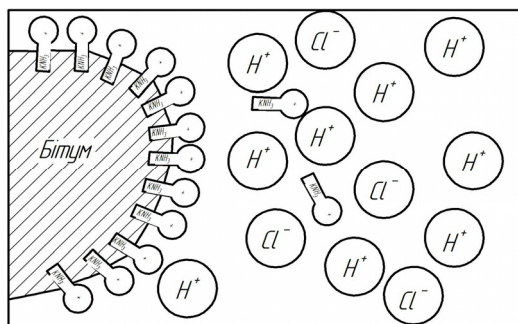


Схема розташування подвійного електричного шару катіонактивним емульгатором

б

Рис. 6.2 Схема будови міцели дисперсної фази у прямих емульсіях з аніонактивним (а) і катіонактивним (б) емульгаторами

Катіонні бітумні емульсії взаємодіють з основними і, що особливо важливо, – з кислими гірськими породами (мінеральними матеріалами), утворюючи на поверхні зерен міцну водостійку плівку.

6.3. Фізико-механічні властивості емульсій бітумних дорожніх

Емульсії бітумні дорожні повинні відповідати вимогам ДСТУ Б В.2.7–129:2013, що наведені в табл. 6.1 для катіонних емульсій і табл. 6.2 для аніонних емульсій.

Таблиця 6.1

Вимоги до фізико-механічних показників катіонактивних емульсій

Назва показника	Значення для марок											
	ЕКШ-40	ЕКШ-50	ЕКШ-55	ЕКШ-60	ЕКШ-65	ЕКШ-70	ЕКС-55	ЕКС-60	ЕКС-65	ЕКП-55	ЕКП-60	ЕКП-65
1. Зовнішній вигляд	Однорідна темно-коричнева рідина											
2. Показник концентрації водневих іонів, рН	1,5-6,5											
3. Однорідність (залишок на ситі №0,14), %, не більше	0,20 0,30	0,25 0,30	0,25 0,30	0,25 0,30	0,25 0,30	0,30 0,40	0,25 0,30	0,25 0,30	0,25 0,30	0,25 0,30	0,25 0,30	0,25 0,30
4. Вміст залишкового в'язучого, %	38-47	48-52	53-57	58-62	63-67	68-71	53-57	58-62	63-67	53-57	58-62	63-67
5. Умовна в'язкість за температури 20 °С на приладі з діаметром отвору витoku 4 мм,	15, не більше	15, не більше	20, не більше	5-25	15-70	45-100	20, не більше	5-25	15-70	20, не більше	5-25	15-70

Закінчення табл. 6.1

Назва показника	Значення для марок											
	ЕКШ-40	ЕКШ-50	ЕКШ-55	ЕКШ-60	ЕКШ-65	ЕКШ-70	ЕКС-55	ЕКС-60	ЕКС-65	ЕКП-55	ЕКП-60	ЕКП-65
6. Стійкість зберігання після 7 дб, залишок на ситі №0,14, %, не більше	$\frac{0,25}{0,30}$	$\frac{0,30}{0,40}$	$\frac{0,30}{0,40}$	$\frac{0,30}{0,40}$	$\frac{0,30}{0,40}$	$\frac{0,40}{0,50}$	$\frac{0,30}{0,40}$	$\frac{0,30}{0,40}$	$\frac{0,30}{0,40}$	$\frac{0,30}{0,40}$	$\frac{0,30}{0,40}$	$\frac{0,30}{0,40}$
7. Стійкість зберігання після 30 дб, залишок на ситі №0,14, %, не більше	$\frac{0,30}{0,40}$	$\frac{0,40}{0,50}$	$\frac{0,40}{0,50}$	$\frac{0,40}{0,50}$	$\frac{0,40}{0,50}$	$\frac{0,50}{0,60}$	$\frac{0,40}{0,50}$	$\frac{0,40}{0,50}$	$\frac{0,40}{0,50}$	$\frac{0,40}{0,50}$	$\frac{0,40}{0,50}$	$\frac{0,40}{0,50}$
8. Зчеплюваність залишкової в'язучої речовини з поверхнею щеплено, балів, не менше	5,0											
9. Змішуваність із сумшами зернових складів, так/ні:	ні	ні	ні	ні	ні	ні	ні	ні	ні	ні	ні	ні
10. Індекс розпаду, %	50-130	50-130	50-130	50-130	50-130	50-130	120-180	120-180	120-180	170-230	170-230	170-230
Примітка. У чисельнику наведені значення для бітумних емульсій, а у знаменнику – для модифікованих бітумних емульсій												

Таблиця 6.2

Вимоги до фізико-механічних показників катіоактивних емульсій

Назва показника	Значення для марок								
	ЕАПМ-50	ЕАПМ-60	ЕАПМ-70	ЕАСМ-50	ЕАСМ-60	ЕАСМ-70	ЕАПМ-50	ЕАПМ-60	ЕАПМ-70
1. Зовнішній вигляд	Однорідна темно-коричнева рідина								
2. Показник концентрації водневих іонів, рН	8,0-12,0								
3. Однорідність (залишок на ситі №0,14), %, не більше	$\frac{0,50}{0,60}$	$\frac{0,50}{0,60}$	$\frac{0,60}{0,70}$	$\frac{0,50}{0,60}$	$\frac{0,50}{0,60}$	$\frac{0,60}{0,70}$	$\frac{0,50}{0,60}$	$\frac{0,50}{0,60}$	$\frac{0,60}{0,70}$
4. Вміст залишкового в'язучого, %	45-55	56-65	66-71	45-55	56-65	66-71	45-55	56-65	66-71
5. Умовна в'язкість за температури 20 °С на приладі з діаметром отвору витoku 4 мм, с	20, не більше	15-50	45-100	20, не більше	15-50	45-100	20 не більше	15-50	45-100
6. Стьйкість зберігання після 7 діб, залишок на ситі №0,14, %, не більше	$\frac{0,60}{0,70}$	$\frac{0,60}{0,70}$	$\frac{0,70}{0,80}$	$\frac{0,60}{0,70}$	$\frac{0,60}{0,70}$	$\frac{0,70}{0,80}$	$\frac{0,60}{0,70}$	$\frac{0,60}{0,70}$	$\frac{0,70}{0,80}$

Закінчення табл. 6.2

Назва показника	Значення для марок								
	ЕАШМ-50	ЕАШМ-60	ЕАШМ-70	ЕАСМ-50	ЕАСМ-60	ЕАСМ-70	ЕАПМ-50	ЕАПМ-60	ЕАПМ-70
7. Стійкість зберігання після 30 діб, залишок на ситі №0, 14, %, не більше	$\frac{0,80}{1,0}$	$\frac{0,80}{1,0}$	$\frac{1,0}{1,2}$	$\frac{0,80}{1,0}$	$\frac{0,80}{1,0}$	$\frac{1,0}{1,2}$	$\frac{0,80}{1,0}$	$\frac{0,80}{1,0}$	$\frac{1,0}{1,2}$
8. Зчеплюваність залишкової в'язучої речовини з поверхнею щебеню, балів, не менше	4,0								
9. Змішуваність із сумішми зернових складів, так/ні: пористого щільного	ні ні	ні ні	ні ні	ні ні	ні ні	ні ні	ні ні	ні ні	ні ні
Примітка. У чисельнику наведені значення для бітумних емульсій, а у знаменнику – для модифікованих бітумних емульсій									

6.4. Дисперсність бітумних дорожніх емульсій залежно від способу отримання

Емульсійні технології у будівництві та ремонтах доріг і аеродромів досить поширені та створюють гідну конкуренцію традиційним. Загалом, 17 % від усього дорожнього бітуму, що випускають у світі, використовують для приготування емульсій.

Емульсія утворюється за одночасного введення бітуму та водної фази. Температура бітуму обирають таким чином, щоб отримати в'язкість порядку 200 сантипуаз, зазвичай вона складає:

140 °C для бітумів 130/200 і

150 °C для бітумів 90/130.

Для обмеження піноутворення температуру водної фази розраховують таким чином, щоб температура емульсії під виготовлення не перевищувала 95 °C.

Якість емульсії визначають її дисперсністю, тобто розміром крапель дисперсної фази. Висока дисперсність бітуму в дорожніх емульсіях зумовлює їх стійкість і суттєво впливає на основні технологічні властивості – в'язкість, швидкість розпаду, однорідність, товщину плівки в'язучої речовини та зчеплення з мінеральними матеріалами.

Відомо, що розмір крапель емульсії залежить від низки властивостей змішуваних рідин (густини, в'язкості та поверхневого натягу), а також їх кількісного співвідношення. Окрім того, дисперсність залежить від способу отримання емульсії та часу перемішування.

Доведено, що деформовані краплі дисперсної фази розпадаються на краплі різних розмірів. При цьому разом з утворенням дуже малих крапель відбувається їх об'єднання і, як наслідок, – збільшення кількості частинок розміром близько 1 мкм через їх злиття. Тому найбільш імовірний розмір крапель емульсії (критична дисперсія) становить 1 мкм. Отримати такі емульсії можна в промислових умовах, способом фізичного емульгування.

Фізичне емульгування (перемішування) може бути механічним з допомогою колоїдних млинів та з допомогою стисненого повітря (барботаж) у диспергаторі. За механічного змішування дисперсність емульсії зумовлюють розмір робочих елементів змішувача та смності, у якій готують емульсію, швидкість обертових частин,

кількість ультразвукових або електрогідролічних імпульсів. Емульсії, отримані з допомогою механічних змішувачів не є однорідними. Середній діаметр крапель дисперсної фази за тривалості змішування 10–40 хв та швидкості 1500 об/хв., знаходиться в межах 12–18 мкм.

Результати досліджень вітчизняних учених показують, що якісніші емульсії отримують з допомогою колоїдних млинів. За цього способу найбільший діаметр крапель не перевищує ($d=6-8$ мкм), а середній розмір перебуває в інтервалі 3–4 мкм.

Емульсії, виготовлені способом змішування високов'язких органічних речовин (мазуту, гудрону, бітуму) з водою з допомогою стисненого повітря (барботаж) є найбільш неоднорідними, грубими. Середній діаметр крапель води (емульсія типу «вода в олії») дорівнює 60 мкм, а максимальний перевищує 110 і навіть 160 мкм за тривалості оброблення 20–25 хв. Навіть у разі використання акустичного диспергатора АД–2 були отримані емульсії, у яких діаметр часток був більший як 50 мкм ($d>50$ мкм).

На відміну від фізичних способів емульгування, для хімічного способу характерне отримання емульсій з підвищеною дисперсністю (середній діаметр часток 1 мкм) і стійкістю. При цьому спостерігається зниження витрат механічної енергії приблизно в 10 разів, а теплової – у 1,5–2 рази. Загалом, хімічне емульгування залежить від якості ПАР, що використовують, і кількісного співвідношення компонентів дисперсної системи.

Але незважаючи на очевидну перевагу останнього способу, застосовувати його нині в умовах дорожнього будівництва майже неможливо через нестабільність якості бітуму та високу вартість ПАР, які виробляють за межами України.

Останнім часом, для приготування емульсій використовують механічний спосіб із застосуванням нетрадиційних конструкцій змішувачів, у основу роботи яких покладені гідродинамічні процеси та явища (гідродинамічні, проточно-кавітаційні змішувачі).

Розподіл розмірів крапель дисперсної фази бітумних емульсій, отриманих у таких змішувачах, відповідає закону Вейбула (рис. 6.3).



Рис. 6.3. Гістограма та диференційна крива розподілу крапель в емульсії (30 % води в 70 % нафтопродукту)

Для аналізу дисперсності емульсій застосовують систему «технічного зору» (рис. 6.4). З її допомогою можна отримати зображення емульсії на різних етапах розпаду. За процесом коалесценції частинок дисперсної фази спостерігають, як правило, через 3–5 хвилин, 1 годину і 48 годин. (рис. 6.5).

Принцип роботи системи «технічного зору» такий: збільшене зображення зразка емульсії, отримане оптичним мікроскопом, передають на телевізійну камеру, оцифровують, обробляють і відображають з допомогою комп'ютера. Визначення дисперсності та статистичний аналіз автоматизовані.

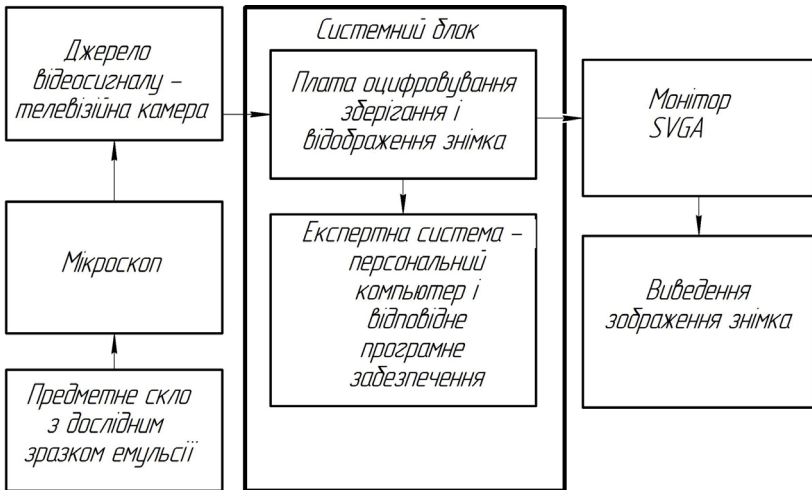


Рис. 6.4. Функціональна схема системи «технічного зору»

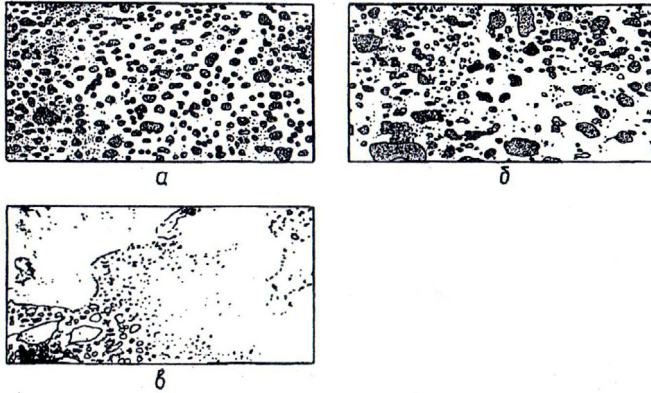


Рис. 6.5. Зображення емульсії (30% води в 70 % нафтопродукту):
a – через 3–5 хвилин; *б* – через 1 годину; *в* – через 48 годин

Аналіз властивостей отриманих емульсій з допомогою гідродинамічного або проточно-кавітаційного змішувача свідчить, що режимів кавітаційної оброблення можна отримувати однорідну обернену емульсію на малов'язких нафтопродуктах дисперсністю 1–2 мкм.

На кавітаційних апаратах можна отримувати також аніонні бітумні емульсії, для приготування яких застосовують бітум марки БНД – 90/130, воду, кубові залишки СЖК та луги – їдкий натр і рідке скло.

Регулювання дисперсності емульсій дає можливість коригувати стійкість емульсій (швидкість розпаду) щодо мінеральних матеріалів і визначати оптимальну швидкість розпаду, найбільш придатну в різних технологіях будівництва та ремонтах доріг і аеродромів.

6.5. Технологічні властивості емульсій бітумних дорожніх

Основною технологічною властивістю емульсій є їх стійкість (стабільність властивостей). Розрізняють стійкість двох видів:

- стійкість зберігання, яка повинна бути якомога довшою;
- стійкість до мінеральних матеріалів, верхні та нижні межі якої зумовлені технологією застосування .

Аналізуючи стійкість зберігання, розрізняють два процеси: відстоювання і коагуляції.

Відстоювання може виявлятися або в осадоутворенні або у розшаруванні:

- осадоутворення – неоднорідність вмісту води по шару емульсії (вміст води зменшується в нижній частині);
- розшарування – зазвичай, зворотний процес, який відновлюється перемішуванням.

Відстоювання можна уповільнити:

- збільшенням дисперсності бітуму в емульсії (зменшення розміру крапель бітуму);
- зменшенням різниці щільності між дисперсною фазою і дисперсійним середовищем, чого досягають, оскільки щільність бітуму складає приблизно 1,02;
- збільшенням в'язкості дисперсійного середовища.

Коагуляція емульсій має дві стадії:

- перша – це утворення агрегатів – часток. Вони злипаються, але не втрачають первинної форми. Це стадія зворотня;
- друга стадія – зрощування агрегатів – часток. Части, які злиплися, з'єднуються, утворюючи крупнішу частку. Це явище незворотне.

Передчасний розпад емульсії може викликати значна кількість надлишків луку в аніонній емульсії і кислот в катіонній емульсії, тобто надлишок сильного електроліту.

Наприклад, бітуми, кислотність яких була змінена додаванням сильних органічних кислот, можуть утворювати нестійкі емульсії за звичайних умов виготовлення, оскільки значна частина цих кислот мігрує у водну фазу

Залежно від вимог технології, що застосовують з урахуванням кліматичних умов району ведення робіт, для отримання стійких бітумних емульсій використовують бітум без домішок (чистий) або модифікований чи розріджений. Це пов'язано з тим, що вихідний бітум повинен мати визначені фізико-механічні характеристики для отримання емульсії відповідно до конкретних видів робіт.

Наприклад, для приготування емульсії для поверхневих оброблень використовують бітум, який повинен мати високі адгезійні та когезійні характеристики. Це необхідно для того, щоб оброблений емульсією щелевий шар успішно чинив опір відриванню під дією транспортного навантаження і мав міцне зчеплення з бітумною плівкою, а бітумна плівка не відривалася від щеленок у верхньому

шарі дорожнього покриття і не руйнувалася під дією механічних навантажень.

Для покращення змочування щебеню, який використовують для поверхневого оброблення, бітум можна пластифікувати розріджувачами на основі нафтопродуктів кількістю 3–5 % від маси бітуму. Збільшення когезії в'язучої речовини (міцності на розрив) досягають використанням бітуму модифікованого полімерами або введенням латексу в бітумну емульсію. Посилення взаємодії бітуму з мінеральними матеріалами здійснюють введенням різних адгезійних домішок.

Загалом, експлуатаційна надійність емульсій багато в чому залежить від якості та виду емульгаторів, що застосовують. На світовому ринку найбільше розповсюдження отримали емульгатори французької фірми СЕКА, Dinogam, Polygam тощо.

6.6. Технологія застосування емульсій бітумних дорожніх

У дорожній і аеродромній галузях емульсії бітумні дорожні використовують з метою:

- підгрунтовки шарів покриття або основи та покриття;
- улаштування шарів зношування наявних асфальто- і цементобетонних покриттів способами поверхневого оброблення і Сларрі-Сил – улаштування тонкошарових покриттів із холодних литих органо-мінеральних сумішей;
- ямкового ремонту асфальтобетонних покриттів холодними асфальтобетонними сумішами.

Підгрутовка шарів покриття для забезпечення надійного зчеплення наявного та нового шарів є важливою технологічною операцією, яка полягає у розливанні в'язучого (бітумної емульсії) кількістю від 0,5 л/м² до 1,0 л/м². Розливання емульсії відбувається безпосередньо перед улаштуванням шарів асфальтобетонного покриття, поверхневим обробленням або укладанням геосинтетичних матеріалів. Перевагою використання емульсії є її низька в'язкість, що забезпечує рівномірне розливання по старому покриттю і економію бітуму в межах 20–30 %.

Улаштування шарів зносу асфальто- та цементобетонних покриттів виконують для підвищення шорсткості (забезпечення

нормативного значення коефіцієнта зчеплення) і захисту покриття від дії атмосферних опадів, відновлення водонепроникності покриття.

Поверхнєве оброблення – це шар зносу товщиною 3–4 см із дрібнозернистих мінеральних матеріалів і бітумної емульсії. Поверхнєве оброблення зазнає інтенсивного впливу від коліс автотранспорту і погодно-кліматичних факторів. Тому термін служби такого шару становить 3–5 років. Поверхнєве оброблення виконують шляхом розливання емульсії у кількості, що залежить від концентрації емульсії, розміру щебеню, стану і типу наявного покриття, а також його терміну служби, розподіл щебенєвого матеріалу й ущільнення улаштованого шару.

Кількість емульсії і щебеню для поверхнєвого оброблення наведена в табл. 6.3.

Таблиця 6.3

**Норми витрати щебеню і емульсії улаштування
поверхнєвого оброблення**

Фракція щебеню, м	Витрата емульсії, кг/м ²		Витрата щебеню, кг/м ²
	Концентрація емульсії 65 %	Концентрація емульсії 70 %	
3/5	1,100	1,000	7,0–9,0
5/10	1,700	1,600	11,5–13,5
10/15	2,000	1,900	15,0–25,0

Поверхнєве оброблення виконує комплект машин:

- автогудронатор;
- навісний, причіпний або самохідний щебенєрозподілювачі;
- самохідні, комбіновані або пневматичні котки.

6.7. Литі холодні органо-мінеральні суміші

Спосіб Сларрі-Сил полягає у використанні литих холодних органо-мінеральних сумішей для улаштування шарів зносу на асфальтобетонних і цементобетонних покриттях товщиною 10–15 мм без ущільнення.

Литі холодні органо-мінеральні суміші являють собою суміші щебеню, дробленого піску, цементу, води, регулятора швидкості розпаду бітумної або бітумнополімерної катіонної емульсій.

Для улаштування таких шарів використовують спеціалізовані комбайни, обладнані ємністю для приготування суміші, асфальтоукладачем та змонтовані на шасі три- або чотириколісного вантажника або дво- чи триколісного напівпричепа.

Необхідність застосування такого обладнання зумовлена особливостями технології, а саме: застосуванням швидкорозпадної катіонної емульсії, яка забезпечує швидке формування шару, завдяки чому є можливість відкриття руху через 20–60 хвилин.

Литі холодні органо-мінеральні суміші застосовують для ремонту вибоїн і ліквідації колій у смузі накату асфальтобетонних покриттів шляхом їх заповнення литою сумішшю.

Залежно від зернового складу литі холодні органо-мінеральні суміші бувають двох типів, розмір фракцій яких повинен відповідати вимогам, наведеним у табл. 6.4.

Таблиця 6.4

Зерновий склад литих холодних органо-мінеральних сумішей

Розміри, мм	Тип I Вміст часток менший від даного розміру, % за масою	Тип II Вміст часток менший від даного розміру, % за масою	Точність дозування, % за масою
10	100	100	
5	90–100	70–90	±5%
2,5	65–90	45–70	±5%
1,25	45–70	28–50	±5%
0,63	30–50	19–34	±5%
0,315	18–30	12–25	±4%
0,14	10–21	7–18	±3%
0,071	5–10	5–10	±2%

Литі холодні органо-мінеральні суміші з мінеральною частиною I і II типу рекомендують застосовувати для формування шарів зносу на автомобільних дорогах I і II категорій, а також для ліквідування ям, вибоїн, колій асфальтобетонних покриттів на дорогах усіх категорій.

У приготуванні литих холодних органо-мінеральних сумішей сумішей часто застосовують модифіковані емульсії. Як модифіка-

тори використовують дівінілстирольні, стирол-бутадієн-стирольні блок-сополімери або пластомери типу етилен-вінілацетатів та етиленметилакрилатів, вимоги до яких відповідають технічним умовам заводів-виготовлювачів

Уміст модифікатора в залишковій в'язуючій речовині (бітум, який залишається після розпаду емульсії) модифікованої емульсії повинен бути в межах 2,5–5,0 % від маси бітуму.

Як регулятор швидкості розпаду емульсії необхідно застосовувати хлористі або оцтовокислі солі моноамінів, поліамінів, амідоамінів або четвертичні солі амонію.

Кількість регулятора швидкості розпаду емульсії, який уводять відносно маси звичайної або модифікованої емульсії повинен бути орієнтовно в межах 0–2 % від маси емульсії. Кількість регулятора може корегуватись (збільшуватись) безпосередньо під час виконання робіт, залежно від температури покриття, типу емульсії та виду мінеральних матеріалів, наявності або відсутності вітру.

6.8. Ямковий ремонт асфальтобетонних покриттів холодними асфальтобетонними сумішами (на основі емульсій)

Холодні асфальтобетонні суміші виготовляють із суміші щебеню, піску з відсівів дроблення і катіонної бітумної емульсії, узятих у відповідних співвідношеннях і виготовлених в установці. Такі суміші укладають у холодному стані (нормальної температури навколишнього середовища). Фізико-механічні властивості холодних асфальтобетонних сумішей повинні відповідати вимогам ДСТУ Б В.2.7-119:2015.

За гранулометричним складом мінеральної частини їх поділяють на дрібнозернисті з найбільшим розміром часток 5–6 мм і середньозернисті – 0–12 мм. Катіонні бітумні емульсії повинні бути виготовлені на пластифікованому бітумі з середньою швидкістю розпаду. Орієнтовний вміст в'язучої речовини в холодних асфальтобетонних сумішах повинен бути в межах:

- для сумішей 0–5 мм – 5,5–6,0 %;
- для сумішей 0–12 мм – 4,5–5,5 %.

Процес приготування таких сумішей доцільно виконувати в установках з примусовим перемішуванням (для кращого перемішування суміші). Для запобігання злежуваності холодних сумішей

застосовують хімічні домішки, що вводять до суміші мінеральних матеріалів з в'язкими речовинами у процесі приготування.

Термін зберігання холодних асфальтобетонних сумішей до 8-ми місяців у герметичній тарі і до 6-ти місяців у штабелях. Висота штабелю повинна бути 1,5–2,0 м.

Холодні асфальтобетонні суміші можна готувати в холодний період року з подальшим брикетуванням, пакуванням і зберіганням до початку робіт.

За використання холодних асфальтобетонних сумішей на емульсіях ремонтні роботи можна проводити за температури повітря 0°C, а наявність води у складі емульсії робить можливим укладання таких сумішей у вологу погоду, що важливо для ремонтів пізньої осені та ранньою весною.

Окрім того, ремонт вибоїн можна проводити з допомогою «залитого» щебеню. Бітумна емульсія і щебінь з допомогою спеціальних машин змішують у гомогенну масу значної міцності. Нагнітання у вибоїну відбувається зі значною швидкістю і не потребує додаткового ущільнення, тому що матеріал ущільнюється за рахунок кінетичної енергії щебеню. Висока якість робіт забезпечує ретельне змішування щебеню з емульсією і «впирскування» матеріалу у вибоїну під тиском. Після заповнення ями (вибоїни) емульсійно-щебеневою сумішшю, поверхню необхідно покрити тонким шаром щебеню, для попередження виносу колесами автомобілів ремонтного матеріалу. Такими матеріалами зручно ремонтувати колії.

Перспективним є метод ремонту тріщин з допомогою бітумних емульсій. Впирскування емульсії здійснюють на всю глибину до заповнення тріщини. Потім в'язчу речовину необхідно покрити дрібним щебенем.

Висока якість робіт, екологічність, зменшення енерговитрат, економія бітуму сприяють широкому розповсюдженню емульсійних технологій на дорогах України.

Структуру бітуму в асфальтобетоні слід розуміти як особливості його розподілення, тобто співвідношення вільного й адсорбованого бітумів, а також товщину бітумних оболонок на мінеральних зернах. Для того, щоб бітум виконував свої функції він повинен бути рівномірно розподілений у суміші та щільно вкривати мінеральні частки.

Мінеральний остов бере на себе значну частину зусиль, тому необхідно щоб він був щільний і складався з достатньо міцних часток.

Проблема подальшого поліпшення властивостей асфальтобетону та збільшення його довговічності пов'язана з необхідністю суттєвих змін структури, наприклад, структури бітуму. Зокрема зміни умов взаємодії мінеральних в'язучих речовин, у результаті чого з'явилися б нові хімічні зв'язки і які наблизили б асфальтобетон до конденсаційної структури, яка є значно міцнішою порівняно з коагуляційною.

Питання для самоконтролю



1. Що таке емульсії бітумні дорожні, та за якими ознаками їх класифікують?
2. Схарактеризуйте структуру емульсій бітумних дорожніх.
3. Назвіть основні фізико-механічні властивості емульсій бітумних дорожніх.
4. Що таке дисперсність емульсії?
5. Які способи використання емульсії бітумної дорожньої в дорожній і аеродромній галузях?
6. Схарактеризуйте використання холодних асфальтобетонних сумішей для ямкового ремонту.

Розділ 7. СТРУКТУРА І ВЛАСТИВОСТІ КОМПОЗИЦІЙНИХ ДОРОЖНЬО-БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ (НА ОСНОВІ НЕОРГАНІЧНИХ В'ЯЖУЧИХ)

Необхідність вивчення закономірностей утворення монолітного матеріалу з багатокомпонентної системи має важливе значення. Спрямоване структуроутворення дорожньо-будівельних матеріалів – бетонів – на основі неорганічних (мінеральних) в'язучих речовин неможливе без вивчення закономірностей перетворення багатокомпонентної системи в монолітний матеріал з урахуванням таких властивостей в'язучих речовин як (адсорбція, адгезія, когезія, розтікання рідкого дисперсного середовища по поверхні твердої фази та впливу хімічних домішок на механізм процесу твердіння.

7.1. Фізико-хімічні процеси структуроутворення композиційних матеріалів на основі неорганічних в'язучих речовин

Під час змішування твердих речовин різної гранулометрії від сантиметрових до мікрометрових часток з в'язучими (рідкими) речовинами відбуваються складні хімічні процеси, не враховуючи які не можна отримати композиційного дорожньо-будівельного матеріалу – бетону з оптимальною структурою і високими фізико-хімічними властивостями.

Сутність закономірностей взаємодії «тверде тіло – рідина» і «тверде тіло – тверде тіло» полягає у визначенні характеру дифузії в розглянутих системах і ролі дефектів у мікро- і макроструктурах бетонів.

В основі технології отримання штучних будівельних матеріалів, на основі високодисперсних систем неорганічних в'язучих речовин, лежить концентрація їх твердої фази в рідкому середовищі, і ті поверхневі явища на міжфазних межах, які ведуть до конгломератного утворення різномірних компонентів суміші.

Закономірності розчинення, утворення насичених і перенасичених розчинів, появи зародків кристалоутворень, їх зрощення, з'єднання з іншими подібними утвореннями визначають основні властивості в дисперсних системах композиційних матеріалів – бетонів.

Утворення трьох типів контактів між частками твердих фаз: точковий – безпосередній контакт між твердими частками різних порошків (в'язучих, мінеральних наповнювачів, пигментів); коагуляційний – поява рівномірного за товщиною прошарку рідини між твердими частками (вода в цементних пастах, розчинах); кристалізаційний – затвердіння гідратної в'язучої речовини між твердими частками наповнювачів, визначають міцнісні та деформаційні властивості композиційних бетонів. Чим більша кількість контактів в одиниці об'єму дисперсної системи, тим вища в'язкість сумішей і міцнішими є затверділі бетони. Однак під час приготування сумішей і їх укладання, збільшення однорідності необхідно знизити цю в'язкість. Таке протиріччя в технології будівельних матеріалів на основі неорганічних в'язучих речовин визначає основне завдання керування контактною взаємодією між частками твердих фаз. Регулювання взаємодії складових компонентів у композиційних системах здійснюють хімічним способом – шляхом спрямованої зміни природи поверхні твердої фази, наприклад, введенням поверхнево-активних речовин (які пластифікують чи збільшують активність середовища) або механічним способом – інтенсифікацією поверхні твердої фази, наприклад, вібруванням.

Покращення фізико-механічних властивостей вихідних матеріалів, вивчення фізико-хімічної взаємодії складових речовин на міжфазних межах, керування цими явищами на всіх стадіях технології отримання композиційного дорожньо-будівельного матеріалу – бетону із заданими властивостями забезпечить високу якість і довговічність дорожніх і аеродромних покриттів.

7.2. Бетони на мінеральні в'язучі речовин - цементобетони

Бетоном називають будівельний матеріал, отриманий в результаті перемішування, укладання, ущільнення і твердіння розрахованого складу суміші з щебеню (гравію), піску, цементу, води і спеціальних домішок, які покращують ті чи інші його будівельні властивості.

Широке застосування бетону пов'язане з тим, що з бетонної суміші можна виготовити вироби різної форми та властивостей у будь-який період року та за короткий термін (термооброблені). Технологія виготовлення бетонних виробів широко механізована й

автоматизована як в горизонтальному, так і у вертикальному поточних напрямках.

Фізико-механічні властивості бетону (міцність, щільність, довговічність) можна регулювати на стадії його структуроутворення за рахунок технологічних прийомів і використання хімічних домішок.

Властивості бетону визначають якість складових речовин і внутрішня будова залежно від гранулометричного складу, форми та міцності зерен, кількісного співвідношення компонентів, та структурні зв'язки між ними, наявність пор і дефектів – мікротріщин, зламів. Так, наприклад, досягнення оптимальних значень фізико-механічних властивостей (щільність, пористість, водо- та морозостійкість) відбувається коригуванням складу і введенням нових речовин. Збільшення міцності на розтяг та згин бетону досягають уведенням у цементне тісто металевих стрижнів (арматури), підвищення стійкості в агресивних середовищах – використанням у складі бетонної суміші відповідних мінеральних в'язучих речовин: сульфатостійких, кислотостійких (кислотоупорних), технологічні властивості застосуванням безсадкових, розширюючих цементів.

За призначенням цементобетону бувають таких видів: звичайний (для будівництва будівель і споруд), дорожній (для будівництва дорожніх і аеродромних покриттів та основ), гідротехнічний (для зведення гребель, шлюзів, гідротехнічних споруд), спеціальний (теплоізоляційний, жаростійкий, кислотостійкий).

7.3. Структура цементобетону та її вплив на його фізико-механічні властивості

Цементобетон – це штучний матеріал, що отримують змішуванням у відповідних пропорціях цементної в'язучої речовини, щебеню, піску, заповнювачів, води та домішок. Суміш вищенаведених компонентів до затвердіння називають *цементобетонною сумішшю*.

Вона зв'язує в єдине ціле в цій суміші цементний камінь, який утворюється внаслідок взаємозв'язку цементу та води. Він визначає основні властивості бетону та його довговічність.

Формування структури цементобетону відбувається за рахунок сумісного протікання гідратних і структурних процесів у цементному тісті (бетонній та розчинній сумішах) з послідовним

переходом від коагуляційної структури до утворення просторового кристалізаційного каркасу. Найбільшої міцності структури досягають оптимальної концентрації дисперсної фази, а за умови певної дисперсності часток за рахунок граничної упаковки й ущільнення системи. Під час замішування наповнених сумішей водою частки наповнювача та цементу в просторовій структурній сітці фіксуються з допомогою коагуляційних контактів. Міцність коагуляційних контактів визначають за формулою:

$$R = \delta(F_p; \varphi; S_{\text{пт}}^2), \quad (7.1)$$

де δ – постійна хімічної взаємодії; F_p – результуюча сила взаємодії часток; φ – міра наповнення; $S_{\text{пт}}$ – питома поверхня часток, які беруть участь у взаємодії.

У цементобетоні розрізняють мікро-, мезо- та макроструктуру.

Мікроструктура – це структура цементного каменю, яка складається з кристалічного зростку, цементного гелю, непрогідратованих зерен цементного клінкеру та порового простору (пори різних розмірів від $r=18-30$ А до $r=1000-10000$ А), яка може змінюватися за розмірами й об'ємом залежно від тонкості подрібнення цементу, його хіміко-мінералогічного складу, хімічних домішок, водоцементного відношення, умов твердіння. Таку структуру професор В. М. Юнг, назвав «мікробетоном», тому що за будовою вона нагадує будову самого бетону, але в мініатюрі.

Тут важливу роль відіграє наповнювач, а саме його хімічна активність і дисперсність. Так, кремнеземисті наповнювачі, вступаючи у взаємодію з гідроксидом кальцію $\text{Ca}(\text{OH})_2$, утворюють низькоосновні гідросилікати. Карбонати кальцію і магнію взаємодіють з алюмінатними клінкерними мінералами з утворенням комплексних сполук типу $3 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot (\text{Ca}, \text{Mg})\text{CO}_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$.

Досягнення максимально можливої дисперсії наповнювачів зазвичай позитивно впливає на фізико-механічні властивості цементних композиційних матеріалів – бетонів. Утворюється міцна дрібнозерниста структура, високоякісна та довговічна.

Мезоструктуру дослідники розглядають як структура цементно-піщаного розчину в класичному бетоні або окремо як піщаний бетон. Цю структуру визначають властивості мікроструктури цементного каменю, а саме – зерновий і хіміко-мінералогічний склад піску (запов-

нювача) та поровий простір між цементним каменем і заповнювачем у зоні контакту (капілярні пори та канали).

Мезоструктура характеризує фізичну взаємодію часток наповнювача як між собою, так і з частинками цементу, що підлягає гідратації.

Середню силу зчеплення ($F_{3, \text{сер}}$) визначають головним чином за радіусом часток або їх дисперсністю та мірою наповнення системи та визначають за формулою:

$$F_{3, \text{сер}} = \frac{18B\phi^3}{r^2}, \quad (7.2)$$

де B – постійна молекулярної взаємодії; ϕ – міра наповнення; r – радіус часток наповнювача.

Максимальної сили зчеплення (контакту) досягають уведенням у суміш пластифікувальних поверхнево-активних речовин (ПАР) або суперпластифікаторів. Уведення ПАР зменшує поверхневий натяг часток, змінює або усуває електростатичну взаємодію і забезпечує оптимальну щільність суміші.

Макроструктура – це структура двокомпонентного бетону, який складається з цементно-піщаного розчину (мезоструктури) і крупного заповнювача. Властивості цієї структури визначають властивості мікро- та мезоструктури, хімічний склад і будова крупного заповнювача та його співвідношення з двома іншими структурами.

На макрорівні наповнювач повинен забезпечити максимальну адгезійну міцність між цементним тістом і заповнювачем, а також когезійну міцність цементної матриці. Міра наповнення повинна бути такою, щоб уже на початковій стадії формування структури були забезпечені визначені реологічні параметри суміші.

Залежно від співвідношення складових макро- та мезоструктури можуть бути: базальними, поровими, контактними. Такі структури характерні для природних кам'яних матеріалів, але відрізняються за розмірами, формами та розміщенням пор.

Пори в цементобетоні можуть бути різних розмірів і типів. Розрізняють такі їх види:

– гелеві – розміром не більш як 1,5 мкм, які виникають між продуктами гідратації і представлені слабо закристалізованими гідросилікатами кальцію;

– капілярні – розміром 1.3 мкм, що утворюються між гідратованими та негідратованими частками цементу; вони утворюють систему каналів, яка знижує щільність цементного каменю, його водонепроникність і довговічність;

– седиментаційні пори – розміром від 50 до 100 мкм, утворюються в результаті поверхневого або внутрішнього водовідведення, ними фільтрує вода, та вони знижують довговічність бетону.

– повітряні – розміром від 25 до 500 мкм, утворюються за наявності повітря в бетонній суміші; вони формуються введенням повітрятягуючих домішок, що збільшують морозостійкість бетону.

Порова структура значно впливає на технологічні властивості цементобетону, які визначають його довговічність. На основі уявлень про структуру порового простору бетону та її залежності від різних технологічних параметрів розроблені методи захисту цементобетонних виробів від руйнівної дії фізичних і хімічних факторів.

Контактна структура утворюється у разі подальшого збільшення вмісту щебеню. Цей тип характерний для важких бетонів, властивості яких визначаються властивостями заповнювача (рис. 7.1)

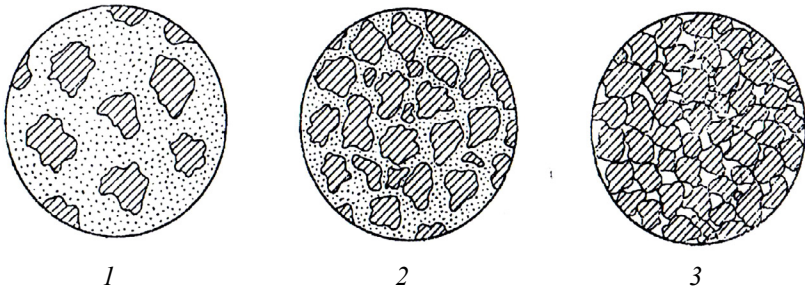


Рис. 7.1. Типи макроструктури бетону:
1 – базальна (з «плаваючим» заповнювачем); 2 – контактна (із щільним пакуванням наповнювача);
3 – пориста (крупнозерниста)

Залежність властивостей бетону від структури та якості складових компонентів необхідно враховувати у проектуванні складу цементобетонних сумішей.

7.4. Класифікація бетонів

Розробленням системи стандартизації бетонів у Європі займається комітет CEN (Comite European de Normalisation), у який входять національні організації зі стандартизації країн Західної Європи (Австрія, Бельгія, Данія, Фінляндія, Франція, Греція, Іспанія, Ісландія, Італія, Люксембург, Нідерланди, Норвегія, Португалія, Швейцарія, Велика Британія, Чеська Республіка).

Європейський стандарт на бетон EN 206–1, затверджений у 2000 році, містить технічні вимоги до вихідних матеріалів, оцінку властивостей бетонної суміші й отриманого бетонного каменю. Згідно з технічними вимогами до бетону передбачене визначення класу бетону за міцністю за стискання (від C 8/10 до C100/115) і класу експлуатації.

Українські стандарти на бетон дещо відрізняються від стандартів європейських країн, причому різниця полягає не тільки в абсолютних значеннях показників тих чи інших характеристик (наприклад, клас важких бетонів визначають за міцністю на стиск в межах В 3,5–В 80), а й у самих характеристиках.

Система стандартів європейських і відповідних стандартів України на бетон і залізобетон наведена на рис. 7.2.

Поділ бетонів (за українськими стандартами) здійснюють за такими ознаками, як: основне призначення, середня щільність, вид використаних в'язучих речовин і заповнювачів, тип структури.

Дорожні цементобетони поділяють на види за такими ознаками:

За структурою (за насипною щільністю) на:

- особливо важкі – більш як 2600 кг/м^3 , зі щільною структурою, виготовляють з використанням заповнювачів – металевих відходів, бариту, залізних руд;
- важкі – $1200\text{--}2600 \text{ кг/м}^3$ зі щільною структурою, із щебеню щільних і важких гірських порід або щільних металургійних шлаків;
- полегшені – $1800\text{--}2000 \text{ кг/м}^3$ зі щільною структурою, але з використанням щебеню низької щільності;
- легкі – $1000\text{--}1800 \text{ кг/м}^3$, які мають щільну або крупнозернисту структуру, виготовляють із пористих щебеню і піску, шлакової пемзи, керамзиту та інших матеріалів;
- особливо легкі – менш як 1000 кг/м^3 з пористою структурою, без щебеню і піску (ячеїстий бетон) або з використанням пористого щебеню і піску.

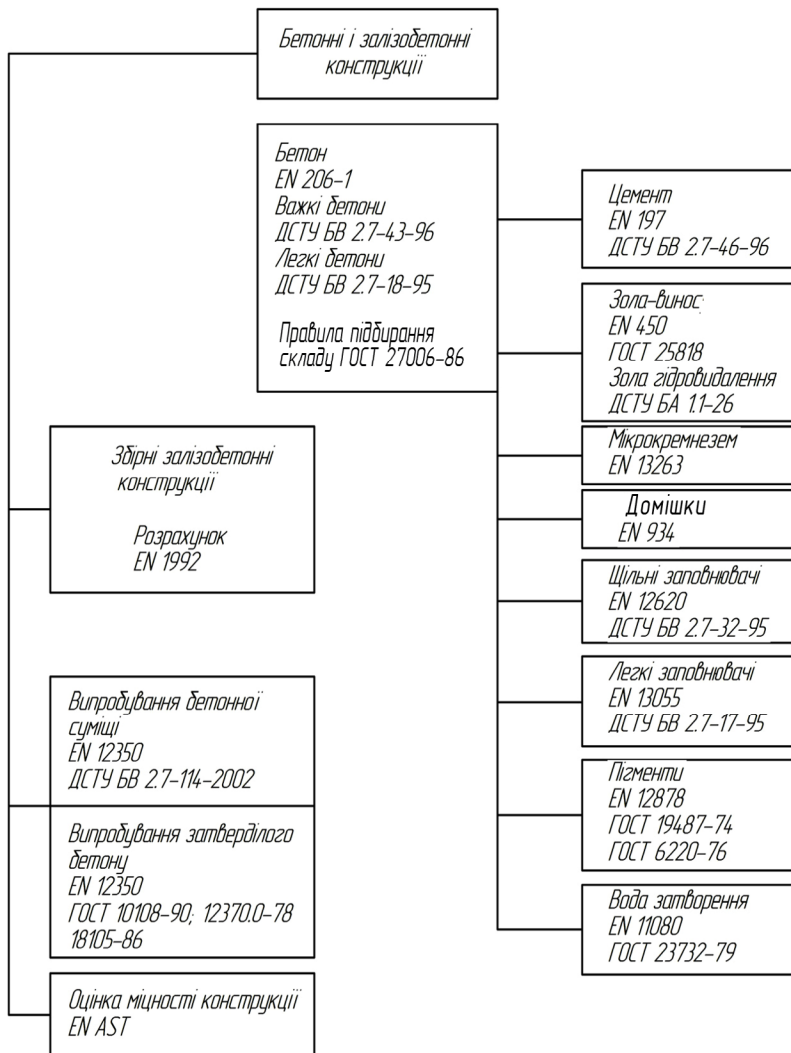


Рис. 7.2. Основні стандарти країн Європи й України на бетон та його вихідні компоненти

- За розмірами крупного заповнювача бетони поділяють на види:
- крупнозернисті із заповнювачем крупністю від 10 до 150 мм;
 - дрібнозернисті – заповнювач крупністю не більш як 10 мм;
 - піщані – пісок крупністю до 5 мм.

7.5. Властивості бетонної суміші та цементобетонну

7.5.1. Реологічні властивості бетонної суміші

Формування цементобетону оптимальної структури тісно пов'язано з реологічними властивостями бетонної суміші і передусім з опором зсуву та в'язкістю, які надалі визначають фізико-механічні, технологічні й експлуатаційні властивості.

Реологія бетону – це здатність змінювати за різних строків експлуатації такі властивості, як граничну напругу зсуву τ , в'язкість η і тиксотропність (період релаксації). Ці властивості залежать від співвідношення цементу і води затворення в цементному тісті та виникнення молекулярних сил зчеплення між цими двома фазами.

В'язкість (η) – внутрішнє тертя – це характеристика текучості (рухомості) бетонної суміші, тобто здатності чинити опір одного компонента бетону іншому. Її визначають як коефіцієнт пропорційності між напругою зсуву (τ) і швидкістю деформації $E = \frac{d\varepsilon}{dt}$ (ε – відносна деформація, t – час). В'язкість бетонної суміші змінюється під дією зовнішніх сил. Послаблюються зв'язки між частками, початкова структура порушується, суміш набуває текучості. У разі зупинення дії зовнішніх сил відновлюється початкова міцність структури, зменшується рухомість.

Напруга зсуву (τ) – це сила (F), що зумовлює початок деформації (суміщення) одного компонента суміші відносно іншого, узятого до площі зсуву (S), тобто $\tau = \frac{F}{S}$, її називають *граничною напругою зсуву* (τ_0).

Структурну в'язкість бетонної суміші можна регулювати введенням структурувальних хімічних домішок, кількість яких залежить від виду домішки, виду цементу та складу бетону. Так, введення в жорстку цемент-піщану суміш поверхнево-активних речовин призводить до прискорення руйнування початкової коагу-

ляційної структури ущільнювальної системи до досягнення найбільшої текучості (найменшої в'язкості η_{\min}) щоб найкращим чином упакувати зерна заповнювача: збільшити контактне склеювання їх поверхонь і так досягти високої кінцевої міцності.

Реологічна модель бетонної суміші може бути описана рівнянням Шведова-Бенгама

$$\tau = \tau_0 + \eta_m \frac{dV}{dx}, \quad (7.3)$$

де τ – напруга зсуву; τ_0 – межова напруга зсуву; η_m – пластична в'язкість системи (коефіцієнт пропорційності між напругою і швидкістю зсуву); $\frac{dV}{dx}$ – градієнт швидкості зсуву.

У разі введення в бетонну суміш грубих часток явище тертя значно впливає на реологічні властивості суміші є тим більшим, чим крупніший розмір заповнювача, а також водоцементне відношення. Саме вода створює ковзання між твердими частками.

Бетонна суміш може утримувати тільки оптимальну кількість води, в іншому разі порушується однорідність суміші та міцність внаслідок розкиду реологічних характеристик.

Бетонна суміш характеризується тиксотропністю – тобто здатністю зворотно відновлювати первинну структуру та властивості після зняття механічного впливу (вібраційного)

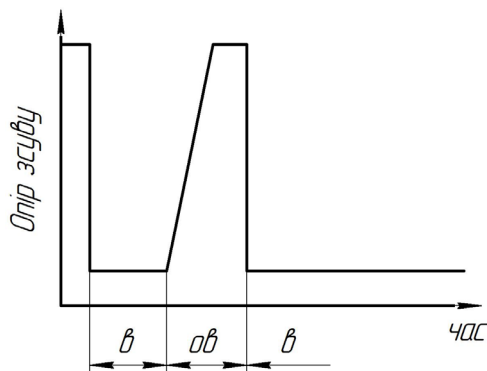


Рис. 7.3. Схема тиксотропного руйнування

7.5.2. Фізико-механічні властивості бетонної суміші

Згідно з ДСТУ Б В.2.7–114–2002 фізико-механічні властивості бетонної суміші оцінюють за такими показниками як: удобоукладальність, середня щільність, пористість, розшарування, температура та збереження властивостей у часі.

Удобоукладальність бетонної суміші характеризують її рухомість та жорсткість, тобто здатність рівномірно розподілятися в опалубці та ущільнюватися за механічного впливу.

Рухомість характеризує величина осідання виготовленого з бетонної суміші конусу (см) під дією навантаження.

Жорсткість характеризує час (сек), необхідний для розпливу (пластичної деформації конусу, виготовленого з бетонної суміші, до рівномірного розподілення у циліндричній ємності приладу, встановленого на вібростолі з коливанням 3000 кол/хв, за амплітуди 0,5 мм.

Усадка конусу безпосередньо пов'язана з опором зсуву (τ), а удобоукладальність – з в'язкістю бетонної суміші (η)

$$\tau = \frac{P}{2S}, \quad (7.4)$$

$$\eta = kT, \quad (7.5)$$

де P – маса бетонного конусу; k – коефіцієнт пропорційності; $S=f(O_k)$ – площа основи конусу, що розплився; T – жорсткість суміші, сек.

Залежно від показника удобоукладальності бетонні суміші поділяють на три групи: наджорсткі (НЖ), жорсткі (Ж) і рухомі (Р). Групи ділять на марки за удобоукладальністю, наведені в табл. 7.1.

Важливим фактором, що визначає технологічні властивості бетонної суміші, є вміст води, тобто водоцементне відношення. За малої кількості, вода взаємодіє з мінеральними складовими суміші, сорбується на поверхні зерен, і суміш є жорсткою. Зі збільшенням кількості води вона заповнює капіляри суміші, сприяє зменшенню

тертя між зернами заповнювача, зниженню в'язкості цементного тіста та збільшенню рухомості суміші. Якщо вичерпана водоутримувальна здатність цементного тіста, вода починає виділятися, бетонна суміш розшаровується, однорідність її структури порушується. Бетонна суміш не розшаровується, якщо опір зсуву розчинної складової дорівнює $(4-8) \cdot 10^4$ МПа (рис. 7.4).

Таблиця 7.1

Марки бетонної суміші за удобоукладальністю

Марка за удобоукладальністю	Норми удобоукладальності за показником		
	жорсткості	Рухомості, см	
		усадка конуса	розплив конуса
Наджорсткі суміші			
НЖ3	Більш як 100	–	–
НЖ2	51–100	–	–
НЖ1	50 і менше	–	–
Жорсткі суміші			
Ж4	31–60	–	–
Ж3	21–30	–	–
Ж2	11–20	–	–
Ж1	5–10	–	–
Рухомі суміші			
Р1	4 і менше	1–4	–
Р2	–	5–9	–
Р3	–	10–15	–
Р4	–	16–20	26–30
Р5	–	21 і більше	31 і більше

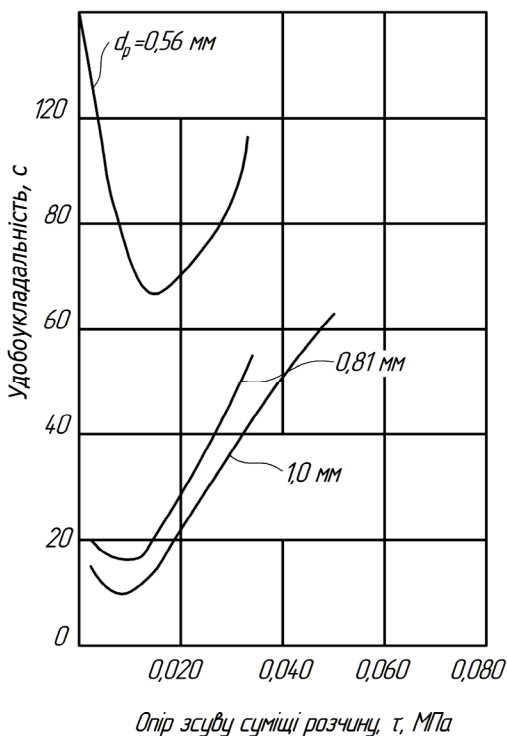


Рис. 7.4. Вплив опору зсуву

Якщо опір зсуву більший за оптимальний, удобоукладальність суміші погіршується. Якщо менший, з її розчинної частини виділяється вода, бетонна суміш розшаровується і пластичність стає незадовільною.

Попередити розшарування суміші можна коригуванням складу суміші, а саме кількості піску та води, а також введенням пластифікувальних домішок, головним чином, лігносульфонатів. Більш ефективно введення суперпластифікаторів, яких на 20–50 % більше, ніж лігносульфатів, що підвищують рухомість і зменшують водопотребу суміші.

Так, наприклад, введення лігносульфонатів збільшує рухомість суміші з 2 см до 6–8 см і зменшує її водопотребу до 10 %.

Розшарування бетонної суміші, що оцінюють за показниками розчиновідділення і водовідділення не повинне перевищувати значень, наведених у табл. 7.2.

Оцінка розшарування бетонних сумішей

Марка бетонної суміші за удобоукладальністю	Розшарування бетонних сумішей, %, не більше		
	Водовідділення	Розчиновідділення	
		важких	легких
НЖЗ-НЖ1	0–0,1	2	3
Ж4-Ж1	0–0,2	3	4
Р1-Р2	0–0,4	3	4
Р3-Р5	0–0,8	4	6

Твердіння бетонної суміші супроводжується комплексом складних фізико-механічних процесів, у результаті яких утворюється цементобетон – штучний матеріал визначеної структури та властивостей.

Маркування бетонних сумішей здійснюють з урахуванням їх властивостей згідно з ДСТУ Б В.2.7–96:2000.

7.5.3. Фізико-механічні властивості дорожнього цементобетону

Дорожній цементобетон – це різновид важкого бетону, який використовують для формування основ і покриттів автомобільних доріг і аеродромів. Бетон дорожніх покриттів працює в складних умовах, оскільки підлягає дії не тільки транспортних засобів, але й атмосферних опадів, коли особливо негативний вплив має почергове заморозування – відтанення, що відбувається взимку. Унаслідок цього, дорожній цементобетон повинен мати значну міцність на розтяг і стиск, морозо- і зносостійкість.

Фізико-механічні властивості дорожнього цементобетону повинні відповідати вимогам ДСТУ Б В.2.7-92-99 «Будівельні матеріали. Суміші бетонні та цементобетони дорожні на вапнякових заповнювачах. Технічні умови». Головними з них є пористість, водопоглинання, міцність на стиск, можливість протистояти деформаціям навантажень і змінам вологості (осадження), морозостійкість, корозійна стійкість, довговічність.

Залежно від призначення дорожній цементобетон поділяють на бетон для одно- та двохшарових покриттів, а також для основ удосконалених покриттів.

Пористість бетону значною мірою визначає його фізико-механічні властивості. Зі збільшенням пористості, зростають і водопоглинання, водонасичення, водопроникність, зменшується міцність, морозостійкість і довговічність.

Пористість бетону визначають за формулою:

$$P_{\text{б}} = P_{\text{ч}} + P_{\text{к}} + P_{\text{пов}} + P_{\text{з}} + P_{\text{мз}}, \quad (7.6)$$

де $P_{\text{ч}}$ – пори гелю в частках від обсягу бетону, які розраховують залежно від рівня гідратації і витрат цементу (орієнтовно $P_{\text{ч}}=0,29U$); $P_{\text{к}}$ – пори контракції; $P_{\text{к}} = V/U - 0,5d$; $P_{\text{пов}}$ – пори, утворені втягнутим повітрям ($P_{\text{пов}} = 2-6 \%$); $P_{\text{з}}$ – пори в заповнювачах; $P_{\text{мз}}$ – простір між зернами заповнювача, незаповнений цементним тістом (для дорожніх бетонів $P_{\text{мз}} = 0$).

Орієнтовно пористість дорожніх бетонів знаходиться в межах від 5 до 15 %.

Водопоглинання дорожніх бетонів коливається в межах 2–4 % від маси. Водопроникність, водопоглинання і водонасичення бетону можуть бути значно знижені, якщо виготовляти бетони з низьким водоцементним відношенням введенням до складу бетону поверхнево-активних домішок. Вони змінюють мікроструктуру в бетоні, за рахунок зменшення водопотреби бетонної суміші і втягування певної кількості повітря в пори і так блокують пересування між окремими капілярами та мікропустотами.

Міцність на стиск бетону – це межа міцності за стиском бетонних кубів розміром 15x15x15 см віком 28 діб за твердінням в нормальних умовах (температура 18–20 °С і відносна вологість 90–100 %). Міцність на стиск бетону – це здатність бетону опиратися руйнуванню у разі виникнення внутрішніх напруг й структурі під дією навантаження або інших механічних зусиль.

Міцність бетону як матеріалу конгломератної будови залежить від міцності окремих його складових, міцності зчеплення між ними й особливостей структури в цілому.

Міцність бетону прямо пропорційна активності цементу (рис. 7.5).

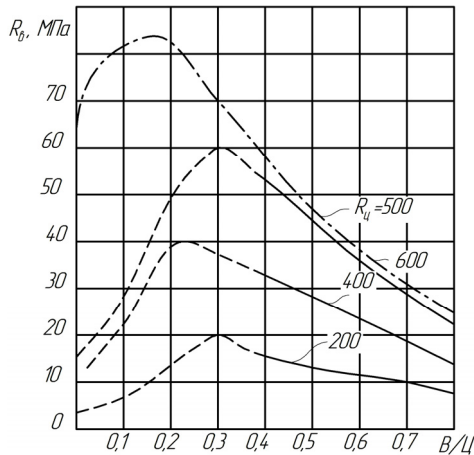


Рис. 7.5. Залежність міцності бетону R_b від активності цементу $R_{ц}$ і водоцементного відношення (верхня крива отримана за сильного ущільнення бетонної суміші)

Зі зниженням В/Ц міцність бетону зростає. Оптимальне значення В/Ц, за якого міцність найбільша, визначається удобоукладальністю суміші та знаходиться в межах 0,4–0,5 (за звичайного ущільнення) і 0,25–0,4 за віброущільнення.

Активацією цементного тіста введенням домішок, які знижують водоцементне відношення або сприяють збільшенню міцності цементного каменю за твердіння, оптимальним ущільненням конгломератної суміші – можна спрямовано змінити міцність і деформативність бетону.

Основним показником міцності на стиск бетону, наведеним у нормативних документах, є його клас – гарантована міцність (МПа), яку беруть із забезпеченістю 0,95, тобто якої досягають не менш ніж у 95 випадках зі 100.

Між класом бетону та середньою міцністю від контролюємої партії існує залежність:

$$B = R_{cp} (1 - 1,64C_v), \quad (7.7)$$

де B – чисельне значення класу бетону, МПа; R_{cp} – середнє значення межі міцності бетону, МПа; C_v – коефіцієнт варіації міцності бетону.

Для переходу від класу бетону до середньої міцності, можна використати формулу:

$$R_{\text{cp}} = \frac{B}{0,778}. \quad (7.8)$$

Міцність на стиск бетону залежить від просторової будови та міцності мезоструктури, якщо остання величина не нижча від міцності зчеплення цементного каменю із заповнювачем. Просторова будова бетону завжди пориста, і її об'ємна величина, віднесена до об'єму розчинної частини міжзернового простору, буде визначати міцність мезоструктури, а відповідно – міцність бетону.

Міцність на стиск бетону визначають за якістю складових його структури: цементного каменю, цементно-піщаного сумішу, міцності заповнювача їх деформативної здатності.

Міцність на стиск бетону може бути представлена залежністю:

$$R_0 = A_1 A_2 A_3 R_{\text{ц}}, \quad (7.9)$$

де $A_1 A_2 A_3$ – коефіцієнти, які кількісно враховують вплив особливостей макро- мезо- та мікроструктур на міцність бетону; $R_{\text{ц}}$ – міцність цементу.

Значення коефіцієнтів макро- та мезоструктур (A_1, A_2) визначаються властивостями щебеню і піску, наведеними в табл. 7.3, 7.4.

Таблиця 7.3

Значення коефіцієнтів макро- та мезоструктури (A_1, A_2) за властивостями щебеню

Щебінь	A_1 на стиск		A_2 на згин	
	Пластичні суміші	Жорсткі суміші	Пластичні суміші	Жорсткі суміші
Вапняковий і шлаковий щебінь	1,08	1,13	1,17	1,22
Фракціонований гранітний щебінь	1,08	1,13	1,08	1,13
Фракціонований гравій	1,00	1,05	1,00	1,05
Звичайний гравій	0,94	1,00	0,90	0,95

Таблиця 7.4

**Значення коефіцієнтів макро- та мезоструктур (A_1, A_2)
за властивостями піску**

Піски	A_1 на стиск і водопотреби пісків, %		A_2 на згин
	7-9	9-12	
Гранітні висівки	1,10	1,05	1,15
Чистий кварцовий	1,00	0,95	1,00
З окатаними зернами і наявністю глинистих часток	0,95	0,90	0,93

Коефіцієнт мікроструктури (A_3) визначають за формулою:

$$A_3 = k \left(\frac{V}{B} - C \right), \quad (7.10)$$

де k і C – коефіцієнти, що залежать від властивостей цементу, технології виготовлення бетонної суміші й активності цементу (табл. 7.5); V – кількість цементу; B – кількість води

Таблиця 7.5

**Коефіцієнти, що залежать від властивостей цементу, технології
виготовлення бетонної суміші й активності цементу**

Коефіцієнти	Бетонна суміш – портландцемент і пластичний розчин		
	стиск	згин	розтяг
k	0,58	0,42	0,21
C	0,50	0,30	0,30

Межу міцності на згин визначають міцністю за злами зразків – балочок розміром 15x15x50 зосередженою силою.

Межі міцності бетону на згин $R_{зг}$ і межі міцності на стиск $R_{ст}$ пов'язані залежністю:

$$R_{зг} = R_{ст}^\alpha, \text{ де } \alpha = 0,6 - 0,7, \text{ тобто } \frac{R_{зг}}{R_{ст}} = 6 - 7 \quad (7.11)$$

Межу міцності на розтяг визначають з допомогою осьового розтягу зразків-балочок. Міцність на розтяг змінюється більшою мірою ніж міцність на стиск і залежить від наявності мікротріщин й інших дефектів структури бетону.

Найбільш слабкими місцями (початком руйнування бетону) слід вважати точки початку розвитку мікротріщин, які з'являються внаслідок:

- дефектів мікроструктури – у контактній зоні за зміни у зрощенні кристалів з утворенням повехні сколювання та появи дислокацій, у недосконалій кристалічній решітці. У міру зростання величини або часу дії напруги (сили руйнування) виникають пластичні деформації дефектних точок на поверхні заповнювача, які сприяють зниженню міцності контактної зони товщиною 20–40 мкм цементний камінь-заповнювач;

- нерівномірної будови мезо- та макроstruktur бетону, які є причинами появи полей напруг, що сприяють за менш напруженого стану появи мікрооб'єму, який виникає від зовнішнього навантаження, і розвитку мікротріщин з наступним процесом руйнування лавинного характеру.

Низкою дослідників було доведено, що між такими характеристиками бетону як структура, міцність і тріщиностійкість спостерігається природний зв'язок. Тому для підвищення якості бетону необхідно покращити мікропластичні властивості кристалічної структури цементного каменю, зменшити розміри зерен кристалів і пор у камені, технологічними прийомами забезпечити їх рівномірний розподіл у мікрооб'ємах. Відпрацювання цих параметрів структури бетону може забезпечити бетонним виробам високу міцність, морозостійкість, водостійкість, що є основними критеріями його довговічності.

7.5.4. Деформаційна стійкість дорожнього цементобетону

Для дорожнього цементобетону характерні як пружні, так і пластичні (усадки, набрякання, повзучість) та температурні деформації.

Пружні деформації бетону характеризує його модуль пружності на стиск (E), тобто відношенню нормальної напруги до відносної деформації за напруження, що дорівнює 0,2 від міцності бетону.

Значення модуля пружності пропорційно зменшується зі збільшенням міцності на стиск, залежно від класу бетону і знаходиться в межах $(9,5-40) \cdot 10^3$ МПа. Окрім того, модуль пружності бетону залежить від його складу, терміну служби покриття і властивостей складових компонентів (заповнювачів).

Пластичні деформації бетону виникають протягом його твердіння.

Усадка – це зменшення розмірів бетону протягом твердіння в повітряно-сухих умовах, зумовлене змінами вологості бетону, контракцією цементного тіста, випарюванням води або її можливим витіканням і просоченням в опалубці. Розміри усадки залежать від мінерального складу бетону, властивостей складових компонентів. Усадка збільшується залежно від збільшення кількості цементу, і зменшується у разі додавання води в суміш заповнювачів. Швидке висихання бетону призводить до нерівномірного усадження і може призвести до появи усадкових тріщин. Усадка цементного каменю знаходиться в межах від 3 до 5 мм/м цементного бетону та в межах від 0,2 до 0,4 мм/м завдяки додаванню заповнювачів.

Набрякання – це збільшення обсягу бетону за позачергового зволоження поверхні, або у разі перебування бетону у воді.

Повзучість – це властивість бетону збільшувати деформації у міру подовженої дії постійного навантаження. Ця характеристика залежить від типу цементу, природи заповнювача та складу бетонної суміші (чим менші витрати цементу та нижче В/Ц відношення, тим менша повзучість).

Деформації повзучості починають розвиватись на початку прикладання навантаження і припиняється тільки за кілька років експлуатації.

Температурні деформації визначають коефіцієнтом температурного лінійного розширення чи стискання, який змінюється залежно від складу та вологості бетону. Коефіцієнт лінійного температурного розширення дорожнього цементобетону Кл – $10 \cdot 10^{-6}$ м/К. Температурні деформації бетону утворюють напруги в дорожніх покриттях і можуть спричиняти розвиток тріщин. Для ліквідації цього явища в бетонних покриттях накладають температурні шви (розширення чи стиску).

7.5.5. Морозостійкість дорожнього цементобетону як показник його довговічності

Морозостійкість бетону – це здатність зберігати свою міцність після багаторазового почергового заморожування і відтанення в насиченому водою стані. Морозостійкість бетону прямо пов'язана з його довговічністю, оскільки довговічність бетону, матеріалу з конгломератною структурою, залежить від будови порового простору.

У марках бетону за морозостійкість беруть найбільшу кількість циклів почергово заморожування відтанення, коли міцність зразків зменшується не більш ніж на 5 % і зниження маси не більш як 3 %.

Бетон пористий матеріал, і якщо всі пори в ньому будуть заповнені водою, він буде руйнуватись на першому циклі заморожування – відтанення, унаслідок виникнення значних напруг розтягу, у разі утворення льоду, обсяг якого на 9 % більший за обсяг води. Однак не всі пори в бетоні заповнені водою, унаслідок замерзання частина води переходить у пори, які є умовно-замкненими.

Пори цієї системи заповнені паро-повітряною сумішшю. Вони є основою морозостійкості бетону, оскільки в них витискається вода з обводнених пор упродовж утворення в них льоду. До таких пор слід віднести дрібні пори «контракції» цементного гелю. Вони порушують суцільність матеріалу, мають значний капілярний потенціал і відсмоктують воду з найбільш крупних капілярів, які мають нижчий енергетичний капілярний потенціал. До звільнених умовно-дискретних, зневоднених пори і витискається вода за гідростатичного тиску. І чим більший об'єм подібних пор і пор контракційного походження, тим вища морозостійкість.

Однак для забезпечення стійкої морозостійкості бетону необхідно, щоб об'єм резервних пор односторонньої величини рівномірно розподілявся в мікрооб'ємі цементного каменю й об'ємі розчинної частини бетону. Це забезпечить одну й ту саму швидкість просування витисненої води в резервні пори з'єднаними каналами. Міцність стінок каналів і оболонок резервних пор забезпечують міцність всієї композиції під час заповнення їх водою і льодом. Інакше руйнування стінок і оболонок пор значно знизить морозостійкість бетону.

Окрім того, на морозостійкість бетону впливає такий фактор як початкове водоцементне відношення (В/Ц), яке збільшує об'єм пор в мікроструктурі цементного каменю (рис. 7.6). І чим воно більше, тим більший радіус пор відкритої пористості.

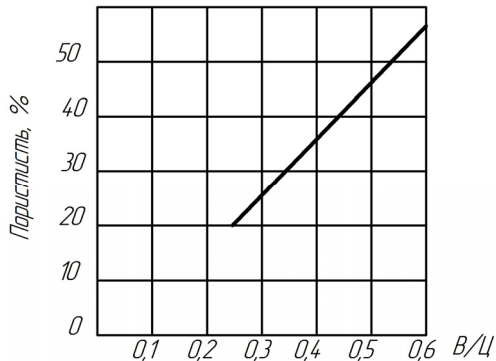


Рис. 7.6. Об'єм пористості цементного каменю

За високих відношень В/Ц розміри капілярів такі великі, що новоутворення цементного каменю не можуть їх перекрити. Бетон з таким поровим простором має високий рівень водонепроникності. Контракційні пори в мікрооб'ємі цементного каменю не можуть у повному обсязі прийняти витиснену воду. Значна частина її переходить в лід, руйнуючи структуру бетону та знижуючи морозостійкість. Для забезпечення морозостійкості бетонів В/Ц відношення має бути не більшим за 0,5. Для бетонів М 500 беруть В/Ц < 0,4; для М 400 – В/Ц < 0,45; М 300 – В/Ц < 0,5; М200 – В/Ц < 0,55.

7.5.6. Корозійна стійкість бетону

Корозійна стійкість бетону – це властивість не руйнуватись під впливом фізико-хімічної дії зовнішнього середовища. Корозія бетону зумовлена, головним чином, корозійною стійкістю цементного каменю. Корозія може бути зовнішньою – від дотику поверхні бетону до агресивного рідкого середовища і внутрішньою, що утворюється в місцях контакту заповнювача з цементним каменем і виявляється у вигляді тріщин і прошарків гелевидних речовин у місцях контакту. Внутрішню корозію бетону визначають, головним чином, як наявність у водному розчині (рідкій фазі) гідроксиду кальцію і з'єднань лужних металів (натрію,

калію), що заповнюють пори бетону та викликають хімічну реакцію з цементним каменем.

Найбільш розповсюдженою і небезпечною є взаємодія з'єднань лужних металів і кремнеземну з деякими видами заповнювачів – опал, халцедон, вулканічні породи сланцю тощо.

Внутрішню корозію можуть викликати хімічними домішки, особливо протиморозні, які для виготовлення дорожнього цементобетону використовують в значній кількості і які містять розчинні солі лужних металів.

Раніше випадки виникнення внутрішньої корозії траплялися дуже рідко, але нині, у зв'язку з погіршенням якості сировини, інтенсивністю виділення лугів продовж обпалу цементного клінкеру, кількість лугів у цементі збільшилась, і прояви внутрішньої корозії цементу зросли.

Для надання корозійної стійкості бетону необхідно використовувати цементи, що протидіють агресивній дії зовнішнього середовища, а саме: шлаковий, сульфатостійкий або глиноземистий, а також бетони підвищеної щільності. Необхідно здійснювати захист поверхні бетонних виробів розчинами рідкого скла, з подальшим нанесенням кремнефтористого натрію або обробляти поверхню бітумом, бітумною емульсією і плівкоутворювальними високомолекулярними речовинами.

7.6. Матеріали для виготовлення дорожнього цементобетону

Будівельні властивості бетону залежать від властивостей і структури складових матеріалів – щебеню (гравію), піску, цементу, води та домішок. Придатність складових матеріалів до виготовлення бетону регламентують відповідні нормативні документи.

Придатність щебеню для виготовлення дорожнього цементобетону визначена вимогами ДСТУ Б В.2.75–98 Щебінь і гравій – щільні будівельні матеріали, що застосовують для виробів конструкцій і робіт. Щебінь отримують дробленням гірських порід і штучних каменеподібних матеріалів – металургійних шлаків.

Міцність на стиск вихідних матеріалів для виготовлення щебеню повинна бути від 20 до 120 МПа. За показником міцності, щебінь повинен бути міцнішим за бетон у 2–2,5 рази, при цьому водопоглинання щебеню має бути не більшим ніж 1 %. Для вироб-

ництва дорожніх бетонів щебінь розробляють на такі фракції: 5–10, 10–20, 20–40, 40–70 мм. Іноді виробники виготовляють фракцію 5–20 мм.

Для отримання щільних сумішей з високими фізико-механічними властивостями використовують щебінь, пустотність якого має бути не більшою як 45 %. У складі щебеню обмежений вміст глинистих і пиловидних часток, вміст яких повинен бути не більшим як 1–3 %, а глини в грудках – не більший як 0,25 %. Пластичних (лещідних) зерен має бути не більш ніж 25 %. У хіміко-мінералогічному складі обмежений вміст сірчаних і сірчаноокислих сполук, що викликають корозію цементного каменю, а також органічних сполук, що призводять до руйнування бетону. Взагалі, краще використовувати щебінь кубовидний.

Внаслідок взаємодії цементного тіста з поверхнею щебеню виникають фізико-хімічні процеси, які зумовлюють міцність зчеплення (адгезію) між цими складовими, тобто міцність бетону. Високе зчеплення забезпечує використання свіжодробленого щебеню з вапняків і металургійних шлаків, а також із гірських порід з тонкопористою текстурою.

Гравій – це матеріал, який утворюється в результаті природного руйнування (вивітрювання) вивержених або осадкових гірських порід. Вимоги до крупності та зернистості складу гравію такі самі як і до щебеню. Краще за все використовувати гравій, який складається із зерен округлої кутової форми зі слабкообкатаною (шорсткою) поверхнею. Пласткі обкатані зерна необхідно дробити. Разом з міцними зернами (граніт, діорит) до його складу можуть входити слабкі зерна пористих вапняків, а також домішки пилу, глини, піску. Якщо вміст піску складає 25–40 %, то матеріал називають *гравійно-піщаною сумішшю*. Міцність бетону з гравієм, зазвичай, на 10–20 % нижча ніж із щебенем.

Пісок – заповнювач бетону, що є сипкою сумішшю мінеральних зерен природного або штучного походження. Придатність природного піску до приготування дорожнього цементобетону визначає ДСТУ Б В.2.7–43–96, де нормована пружність зерен, мінералогічний склад, кількість і вид домішок. Наявність у піску органічних домішок значно знижує якість бетону, руйнуючи цементний камінь. Наявність таких домішок визначають з допомогою колориметричної проби. Пісок заливають 3 % розчином NaOH і

після перемішування залишають на 24 години. Якщо колір проби темніший за колір еталону, пісок непридатний для застосування.

Природні піски – це слабкоокатані, крупнозерністі піски – річкові, морські або ставкові. Природні піски поділяють за складом на кварцеві, польовошпатні та карбонатні. У деяких випадках вони утримують домішки ракушок, гравійні зерна, а іноді глину. У використанні для приготування бетону природні піски необхідно погрожувати і промивати водою. Після подрібнення кристалічного кварцу утворюється кварцовий пісок, який характеризується аморфним станом, але за сумісного подрібнення кварцового піску і цементу утворюються нові «свіжі» поверхні кварцових зерен. Це відбувається внаслідок механохімічного явища, яке полягає в тому, що в момент утворення нової поверхні відбувається гетеровалентне заміщення Si^{4+} на Al^{3+} , що веде до до активації зерен, і кварцовий пісок стає гідравлічно-активним заповнювачем.

При цьому на контактах кварцового та цементного зерен утворюються мінерали цементної в'язучої речовини і гідросилікатів кальцію, що не тільки збільшує контактну міцність між ними внаслідок відсутності товстого водного прошарку, але й надає додаткового об'єму цементному гелю в одиниці об'єму цементного каменю і розчинній частині мікроструктури бетону. Перевага сумісного подрібнення цементної в'язучої речовини та кварцового піску підтверджують дослідження багатьох вчених. Молекула Si в природі хімічно інертна, оскільки зв'язки внутрішніх і зовнішніх атомів зкомпенсовані.

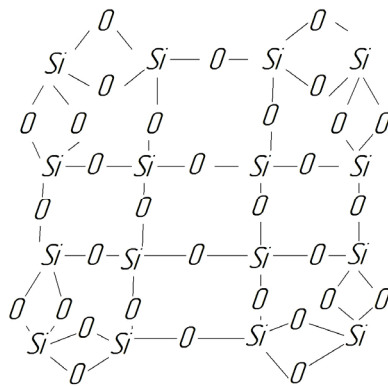


Рис. 7.7. Зкомпенсовані зв'язки внутрішніх і зовнішніх атомів

Унаслідок руйнування кристалів кварцу (пунктирна лінія) відбувається розривання зв'язків Si-O, і вони стають ненасиченими. Розірвані зв'язки стають активними з від'ємним зарядом, оскільки на поверхні переважно знаходяться атоми O₂. Ці атоми легко адсорбують молекули води завдяки здатності атомів кисню і водню води утворювати водневі зв'язки з гідроксильними групами.

Групи SiOH є активними центрами, які забезпечують поверхневому шару хімічну активність.

Унаслідок сумісного подрібнення кварцового піску і цементу частина іонів водню OH-груп заміщується іонами Na⁴⁺, K⁴⁺, Ca³⁺, Al³⁺, Fe³⁺ та ін. (рис. 7.8).

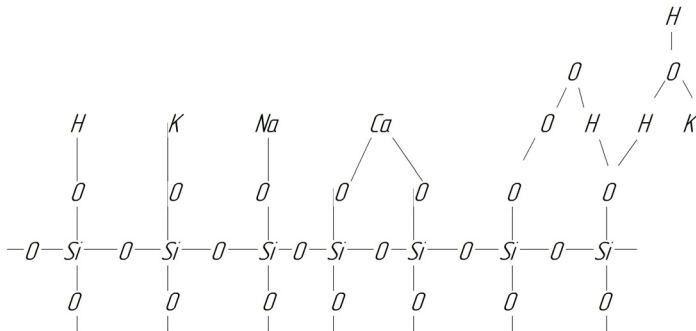


Рис. 7.8 Поверхня шару частки кремнезема із заміщеними іонами

У результаті сумісного подрібнення цементної в'язучої речовини з кварцевим піском у співвідношенні 50:50 % за масою можна отримати піщанистий цемент, активність якого буде рівнозначна активності портландцементу.

До штучних пісків відносять ті, що отримують у результаті подрібнення природніх гірських порід (гранітні висівки) та інших гірських порід вулканічного походження (туф, пемза, перліт) або відходів промисловості – металургійних шлаків, золи-виносу ТЕЦ і використовують як місцеві матеріали.

Прогресивна технологія виготовлення бетонних сумішей – введення пластифікуючих домішок, примусове перемішування, віброущільнення ефективно підвищує застосування місцевих матеріалів.

Воду для затворення бетонних сумішей використовують чисту, проточну, яка відповідає вимогам ГОСТ 23732–79 «Вода для бетонів і розчинів». Згідно з технічними умовами вона не містить

вільних мінеральних і органічних кислот. Значення водного показника рН 4–12,5. Болотні, торфяникові та стічні, забруднені промисловими відходами води застосовувати не можна, тому що домішки органічних речовин, цукрів, домішок нафтопродуктів, масел і жирів ведуть до уповільнення процесів гідратації цементу, зниження зчеплення заповнювача з цементним тістом і зменшення міцності бетону.

Сумарна кількість розчинної солі у воді, що містить аніони SO_4^{2-} і Cl повинна бути не більшою як 5г/л, оскільки внаслідок збільшення концентрації вони кристалізуються в порах цементного каменю і утворюють на поверхні бетону висоли, що значно погіршує зовнішній вигляд покриттів і стає причиною виникнення корозії.

7.7. Хімічні домішки для покращення властивостей дорожнього цементобетону

Домішки, що використовують для покращення властивостей бетонних сумішей і бетонів, повинні відповідати вимогам ДСТУ Б В.2.7-65-97 і за функціональним призначенням та дією їх поділяють на: домішки, що регулюють властивості бетонів і бетонних сумішей, пластифікуючи, стабілізуючи, водоутримуючи, покращуючи перекачування сумішей, повітряутягуючи, регулюючи процеси тужавіння і твердіння (уповільнювачі або прискорювачі), а також ті, що змінюють характер процесів структуроутворення бетону та надають йому спеціальних властивостей (протиморозні, гідрофобізатори) і комплексні (поліфункціональної дії), що дають можливість регулювати кілька властивостей бетонної суміші та бетону.

Пластифікувальні домішки збільшують рухомість або знижують жорсткість суміші, не зменшуючи міцності бетону. До них відносять різні ПАР і відходи хімічної промисловості.

Пластифікувальні домішки вводять у кількості 0,1–0,5 % від маси цементу.

За характером дії розрізняють гідрофільно- і гідрофобнопластифікувальні домішки.

До гідрофільно-пластифікувальних відносяться лігносульфонат технічний (ЛСТ), який містить лігносульфати – кальцієві sf-CH_3 ,

натрієві sf-Nhs і гідроксикарбонові кислоти з різним вмістом цукрів.

Механізм дії гідрофільно-пластифікувальної домішки – лігносульфат технічний (ЛСТ) полягає у тому, що активні молекули ПАР, адсорбуючись своїми полярними групами на гідрофільних поверхнях в'язучої речовини, створюють мономолекулярну плівку із сульфолігнатів (солі лігносульфонової кислоти). Ця плівка гідрофільна й утримує біля себе значну кількість води. Молекули води, що знаходяться ближче до поверхні часток цементних зерен, утримуються молекулярними силами – вандервальсовими, інші молекули занурюються в колоїдно-адсорбційний шар. Ці шари і створюють гідродинамічне змащування між зернами цементу й одночасно знижують ефект гідратації в'язучої речовини. Це покращує процес твердіння цементного гелю в початковий термін твердіння. Стабілізувальний ефект, надалі, сприяє утворенню дрібнодисперсної високоміцної кристалічної структури цементного каменю та дозволяє скоротити витрати цементу до 10 %.

Для прискорення твердіння (гідратації цементу з утворенням цементного каменю) до лігносульфатів додають хлорид кальцію CaCl_2 , сульфат натрію Na_2SO_4 , нітрат кальцію $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ і нітрат натрію NaNO_3 . Механізм дії цих домішок полягає в тому, що вони знижують рН середовище і прискорюють гідратацію цементу за рахунок збільшення кристалізації.

До найбільш поширених гідрофобно-пластифікувальних домішок можна віднести милонафт, ГКЖ-10, ГКЖ-12 (етил-силікат натрію), ГУЖ-94 (етилгідросилоксанова рідина) та інші.

Суперпластифікатори – це синтетичні полімерні речовини, що складаються з аніонактивних органічних речовин колоїдного розміру (молекулярна маса ≥ 2000) зі значною кількістю полярних груп у ланцюгу. Уперше суперпластифікатори були застосовані в Японії в 1964 році, а потім – у 1972 році у ФРН. Найбільш використовувані суперпластифікатори – це продукти конденсації нафтолігносульфоїкислоти з формальдегідом (SNF) і мелаїносульфоїкислоти з формальдегідом (SHF).

Суперпластифікатори додають у бетонну суміш у кількості 0,25–1,0 % від маси цементу. Вони характеризуються значним розріджувальним ефектом, час дії якого від моменту введення обмежується 2–3 годинами. Завдяки додаванню суперпластифіка-

торів рухомість бетонної суміші зростає з 4–6 см до 22 см усадка стандартного конусу без зниження міцності бетону. Скорочуються витрати цементу на 10–20 %, прискорюється зростання міцності, спрощується технологія формування бетонних виробів.

Уведення суперпластифікаторів сприяє утворенню на поверхні цементних зерен (і перш за все на швидкогідратованих СЗА і гіпсі) потовщеної плівки. Вони не збільшують доступ води до внутрішніх шарів цементного зерна за рахунок адсорбції гольчастих кристалів оттригиту в плівці. Час дії такої плівки обмежений утворенням на її поверхні нової плівки з гідратів клінкерних матеріалів. У зв'язку з цим механізм дії домішки з часом зменшується, а її кількісна величина обмежується.

Зниження кількості води під час приготування бетонної суміші позитивно впливає на внутрішню структуру бетону; вона стає більш однорідною, макро- і мікропори в розчинній частині та цементному камені розміщуються рівномірно. За рахунок новоутворень дрібних кристалів збільшеної міцності покращується кристалічна будова цементного каменю. Таким чином, суперпластифікатори є регуляторами структури бетону, забезпечуючи його водонепроникність, морозостійкість, тріщиностійкість і підвищення його деформаційних властивостей.

Прискорювачі твердіння призначені для скорочення терміну розпалубки конструкції у процесі монолітного бетонування, а у виробництві збірного залізобетону – для зменшення часу теплового оброблення виробів. Найбільш розповсюдженими є хлорид кальцію CaCl_2 , сульфат натрію Na_2SO_4 , поташ KCO_3 , нітратикальцію $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ і натрію NaNO_3 . Дія цих прискорювачів полягає в тому, що вони знижують розчинність гідроксиду кальцію $\text{Ca}(\text{OH})_2$, який утворюється протягом гідратації цементу.

Уповільнювачі твердіння – це домішки, які одночасно знижують водопотребу суміші до витрати цементу, наприклад, органічні сполуки (ЛСТ) і кремнійорганічні рідини ГУЖ-10, ГУЖ-11.

Протиморозні домішки використовують за необхідності бетонування в зимових умовах. Вони знижують температуру замерзання води, забезпечують можливість взаємодії води з мінералами цементу або самі вступають у взаємодію з мінералами цементу, прискорюють твердіння і зумовлюють виділення теплоти.

Частіш за все використовують хлориди кальцію CaCl_2 і натрію NaCl , поташ та інші.

Гідрофобізуючі (повітряутягуючі) домішки – знижують поверхневий натяг і сприяють повітряутягуванню в бетонну суміш, тобто втягуванню до її складу найменших повітряних кульок, завдяки чому бетонна суміш має кращу удобоукладальність і підвищену морозостійкість. Підвищення морозостійкості пояснює, що повітряні кульки в бетоні виконують роль резервного обсягу для замерзання води та попереджують виникнення напруг від тиску льоду. Частіш за все як гідрофобізуючі домішки використовують смолу нейтралізовану повітряутягуючу (СНВ), і смолу деревинну омилена (СДО).

Комплексні домішки (поліфункціональної дії) мають особливість дії, яка полягає в тому, що пластифікувальна дія гідрофобізуючого компонента пов'язана з утворенням шарів з орієнтованих молекул (рис. 7.9 б), а компонента – з утворенням тонких шарів води, що прилягають до твердих часток (рис. 7.9 а).

Якісну оцінку їх дії характеризує відношення гідрофільних і гідрофобних часток молекул. Для цього підраховують гідрофільно-ліпофільний (гідрофобний) баланс – ГЛБ. Якщо величина дисперсії його у воді менша за 4, то з'являються гідрофобні властивості, якщо ЛГБ менша за 13 – то гідрофільні.

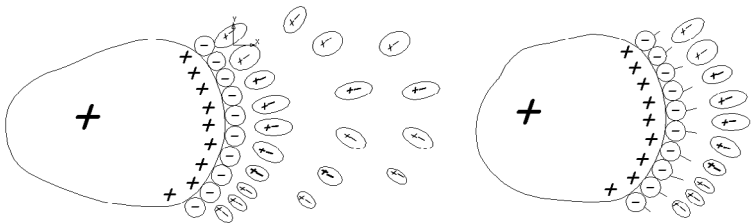


Рис. 7.9. Схеми поверхонь цементних часток у разі введення комплексної домішки: а – гідрофільна: 1 – шар іонів; 2 – шар води (шар ковання між частками цементу); б – гідрофобна: 1 – сильне поле взаємодії; 2 – дуже слабе поле взаємодії (площини ковання).

Комплексні домішки дозволяють на 12–25 л скоротити витрати води та збільшити вміст повітря в суміші на 4–6 %, підвищити морозостійкість і водонепроникність, скоротити витрати цементу на 5% і збільшити міцність бетону на 10–15 %.

Як комплексні домішки застосовують ЛСТ+СНВ, що пластифікує бетон і підвищує морозостійкість бетону, ЛСТ+CaCl₂, пластифікує суміш, прискорюючи твердіння бетону, скорочуючи витрати цементу.

Окрім того, комплексними домішками є практично всі суперпластифікатори.

7.8. Фібробетон для дорожнього і аеродромного будівництва

Фібробетон – це дисперсно-армований композиційний матеріал на основі неорганічної в'язучої речовини – цементу, який отримують шляхом уведення до складу бетонної суміші (до затворення) мінеральних, металевих або полімерних волокон (базальт, скло, сталь, азбест, поліпропілен) тощо. Матеріал, виготовлений за такою технологією, характеризують більша міцність на стиск (на 15–20 %) і розтяг (на 20–25 %) і висока тріщиностійкість – 1,5–2 рази.

Збільшення міцності бетону на стиск і розтяг за рахунок уведення волокон зумовлене тим, що вони міцніші та жорсткіші порівняно з основною матрицею бетону, завдяки цьому вони сприймають основну частину навантаження на нього.

Тріщиностійкість бетону – це здатність чинити опір тріщиноутворенню, викликаному як дією зовнішніх (механічні зусилля), так і внутрішніх факторів (усадкові, температурні деформації).

Тріщини в бетоні з'являються тоді, коли деформації розтягу (E_p), які виникають внаслідок зменшення міцності на осьовий розтяг, модуля пружності і збільшення деформативності (граничного розтягу за осьового розтягу) перевищують граничний розтяг бетону ($E_{тр}$).

Для використання в бетонних сумішах, волокна повинні мати однакову міцність і модуль пружності, вищий за модуль пружності матричного матеріалу і, окрім того, вони повинні мати високе зчеплення з цементом. За даними Дж.Ромуальді і А.Манделя, для оптимізування впливу волокон на властивості цементної суміші необхідно враховувати відстань між волокнами (S), яку розраховують за формулою:

$$S = kd\sqrt{\frac{1}{P}} \quad (7.12)$$

де k – емпіричний коефіцієнт; d – діаметр волокна; P – кількість волокон в обсязі матеріалу, %.

Чим нижчий k , тим вища міцність отриманого композиційного матеріалу – фібробетону. Орієнтовно, відстань між окремими волокнами (фібрами) повинна бути 10–12 мкм. Найбільш ефективно використовувати дисперсне армування для виготовлення дрібнозернистих бетонів.

Види та характеристики волокон, що використовують для дисперсного армування композиційних матеріалів – бетонів, наведені в табл. 7.6.

Таблиця 7.6

Фізико-механічні характеристики волоконних матеріалів

Види волокон	Матеріал	Середня щільність, г/см ³	Діаметр, мкм	Міцність на розтяг, МПа	Модуль пружності, МПа	Подовження за розриву, %	Вогнестійкість, °С
Металеві	Сталь	7,8	10–200	0,8–3,2	200,0	3–4	1500
Природні органічні	Бавовна	1,5	10–50	0,4–0,7	4,9	3–10	150
	Сизаль	1,5	10–50	0,8	–	3	150
Природні неорганічні	Азбест	2,6	0,2–30	0,9–3,0	68,0	0,6	1450
	Базальт	2,8–3,3	5–25	1,5–6,0	90–100	1–2	3000
Штучні органічні-полімерні	Поліамід	1,4	10–500	0,7–0,75	8,0	250	200
	Поліпропілен	0,9	10–500	0,4–0,8	3,5–8	10–23	150
	Поліетилен	0,95	10–500	0,7	1,4–4,2	10,0	130
Штучні неорганічні	Акрил	1,1	10–500	0,2–0,4	2,1	25–45	130
	Вуглець	2,0	5–10	2	245	1,0	400–1600
	Скло	2,6	5–20	1,5–4,0	70–80	1,5–3,5	800

Для рівномірного розподілу волокон у бетонній суміші довжина волокон повинна бути не більшою ніж 5 мм, незалежно від виду. Кількість додавання в бетон становить від 1 до 4 % від маси суміші.

В останні три десятиліття почали широко застосовувати сталеві фібробетон. Кращі фізико-механічні властивості сталеві фібробетону

полягають у підвищеному опорі розтягу і високій в'язкості руйнації, оскільки фібри створюють ефективний опір розкриттю тріщин (опір в осьовому щодо фібри напрямку).

Високі результати показав сталевібробетон з аморфною фіброю з підвищеною корозійною стійкістю. Збільшення діаметру фібри до 0,1 мм дає збільшення упору відриванню, тобто деформування відбувається за механізм накопичення пошкоджень із поступовим зниженням опору, чутливості до концентрації напруг. Дослідження С. З. Харченка і О. К. Гревцева показали, що для сталевібробетону через небезпеку корозії, звичайної, неанодованої фібри межеве навантаження близьке до межі тріщиностійкості. Навпаки, для сталевібробетону зі аморфною фіброю такої небезпеки немає. Окрім того, використання сталевібробетону з аморфною фіброю збільшує несучу здатність елементів конструкції у 1,5 рази і підвищує термін їх служби, порівняно зі сталевібробетоном із звичайними сталевими фібрами. Застосування сталевібробетону в дорожніх покриттях знижує матеріалоемність шару дорожнього одягу на 40 % і вартість – на 14,4 %. На сьогодні розроблені різноманітні засоби регулювання властивостей сталевібробетону. Отримати необхідні характеристики сталевібробетону можна шляхом оптимального вибору об'ємного вмісту фібри, її діаметру та відношення довжини фібри до діаметру.

З неметалевих волокон широко застосовують скляні і базальтові.

Скляні волокна зазвичай мають діаметр близько кількох десятків мікрометрів і довжину 20–40 мм. Їх характеризують висока міцність на розтяг (1500–3000 МПа) і модуль деформації, вищий ніж у цементного каменю. Температурний коефіцієнт лінійного розширення скловолокна близький до значень цементного каменю. Проте скло швидко руйнується під дією лужного середовища цементу, тому необхідно передбачати застосування в'язучих речовин або вжити спеціальних заходів, що запобігають руйнації скляних волокон у бетоні від корозії. До цих заходів можна віднести використання глиноземистого цементу, різноманітних домішок, що зв'язують луги, а також просочування бетону різними полімерами.

Найбільше розповсюдження одержали три типи скляних волокон: тип Е – волокна безлужні, що мають недостатню стійкість до кислих середовищ (застосовують у США, Франції, Великій Брита-

нії, Німеччині); тип С – волокна малолужні з підвищеною стійкістю і тип А – волокна лужні з високою хімічною стійкістю (типи С і А застосовують, головним чином у США і Росії). Технологічна простота влаштування зовнішнього двогілкового склопластикового армування робить ефективним його використання для зміцнення конструкцій (плит, оболонок і т.ін.), особливо за наявності агресивних середовищ. Але дослідження довговічності склофіробетону та зміни його фізико-механічних властивостей у часі показали, що з часом міцність такого матеріалу знижується на 10–30 % залежно від відносної вологості навколишнього середовища. Підвищення об'ємного вмісту скловолокна >1,5 % викликає інтенсивне зростання деформацій повзучості в стисненій зоні та збільшення прогинів виробу, а в розтягненій зоні – збільшення розвитку деформацій повзучості.

Враховуючи вищенаведені недоліки, були розроблені корозійностійкі скляні волокна, наприклад, боросилікатні, цирконієві, які можна використовувати в цементах різних типів без обмежень.

Вихідним матеріалом для базальтових волокон слугують гірські породи – базальти, що являють собою дрібнозернисті ефузивні породи вулканічного походження. Базальтове волокно отримують шляхом плавлення базальтової гірської породи та витягування у волокна отриманого розплаву. Міцність базальтового волокна діаметром 8 і 12 мкм складає відповідно 1500 і 2600 МПа, а щільність – 2,8–3,3 г/см³. Дослідження властивостей базальтових волокон показали їх хімічну стійкість до дії кислот і лугів. Доцільність використання базальтофіробетону для влаштування аеродромних і дорожніх покриттів підвищеної надійності і стійкості до високих навантажень упродовж експлуатації доведена Д. В. Кураковим і К. В. Краюшкіною.

Фіробетон з полімерними волокнами має високу міцність на розтяг і є корозійностійким матеріалом. Модуль пружності волокон менший ніж цементного каменю, а коефіцієнт теплового розширення в 3–9 разів вищий. Вогнестійкість волокон відносно низька (150–200 °С), але в бетоні вони захищені цементним каменем. Полімерні волокна дорогі, але їх використовують у конструкціях, що експлуатують в умовах дії ударного навантаження, або агресивних середовищ, де сталь швидко зменшує свої експлуатаційні властивості.

Зі всіх видів полімерних волокон найбільш широко розповсюджені поліамідні.

Останнім часом у практиці дорожнього будівництва широко використовують комбінації різноманітних волокон. Наприклад, металевих і полімерних, металевих і базальтових.

Уведення волокон дуже важлива операція, тому що бетонна суміш із фібрами схильна до грудкування, а фібри можуть утворювати в бетонній суміші «їжаки», що значно погіршує якість бетонної суміші та не дозволяє досягти належного ущільнення фібробетону. Для приготування фібробетонної суміші використовують різноманітні технологічні прийоми: фібру вводять у попередньо перемішану суміш цементу, води та заповнювача (I-й спосіб) або змішують спочатку заповнювач і волокно, а потім додають цемент і воду (II-й спосіб).

Результати властивостей дорожнього цементобетону з фіброю – фібробетону наведені в таблиці 7.7.

Таблиця 7.7

Результати властивостей дорожнього цементобетону з фіброю – фібробетону

Назва бетону	Кількість фібри, % від маси бетону	Показники міцності, МПа		
		на стиск $R_{ст, 28}$ діб	на згин, $R_{зг}$	
			7 діб	28 діб
Цементобетон	–	21,5	4,8	5,8
Перший спосіб уведення фібри				
Фібробетон з металевою фіброю	3,0	23,1	5,7	6,1
Фібробетон з базальтовою фіброю:				
груба	2,2	20,6	6,2	7,1
тонка	3,4	22,4	5,9	6,5
Фібробетон з поліамідною фіброю	3,5	22,6	5,3	6,0
Другий спосіб введення фібри				
Фібробетон з металевою фіброю	3,0	22,8	5,1	6,1
Фібробетон з базальтовою фіброю:				
груба	2,2	28,3	6,4	8,3
тонка	3,4	27,8	5,3	7,9
Фібробетон з поліамідною фіброю	3,5	22,8	5,6	6,2

Склад бетону:

Портландцемент М 500 із нормальною густиною 25 %

Пісок річковий Дніпровський з модулем крупності $M_{кр} - 1,49$ (дрібний), вміст пилюватих і глинистих часток – 2%, насипна щільність – 1280 кг/м³.

Щебінь Гніванського кар'єру фр. 5–20 та 20–40 мм.

У суміш вводили пластифікувальні та повітрявтягувальні хімічні домішки.

Перемішування фібробетонної суміші краще здійснювати у змішувачі гравітаційного принципу дії. Ущільнення суміші в лабораторних умовах виконують у стандартних формах на лабораторному столі з частотою коливань 3000 на хвилину. Спосіб уведення фібри не має принципового значення і не впливає на показники міцності фібробетону.

7.9. Спеціальні види бетонів

Гідротехнічний бетон використовують для виготовлення виробів і споруд, що постійно контактують з водою. Він повинен бути стійким до дії проточних вод і агресивних середовищ, щільним, міцним. Для його виготовлення використовують пуцоланові цементи, шлакопортландцементи, а іноді й сульфатостійкі цементи. Додавання тонкоподрібнених кварцевих пісків і гранульованого шлаку підвищує стійкість бетону та знижує виділення тепла впродовж твердіння і осадження.

Жаростійкий бетон використовують для улаштування споруд, які експлуатують під дією високих температур від 400 до 2000 °С. За призначенням жаростійкі бетони поділяють на конструкційні та теплоізоляційні. За типом структури розрізняють щільні (важкі) і ячеїсті (легкі). Як в'язучу речовину для виготовлення жаростійких бетонів використовують портландцемент, шлакопортландцемент, глиноземистий цемент, рідке скло, лужні, фосфатні й алюмінатні в'язкі речовини. Як заповнювачі використовують золошлакові суміші, керамзит, шамот, магнезит та інші. Основними характеристиками жаростійкого бетону є міцність на стиск від 7,5 до 25 МПа, водопоглинання 10–20 %, насипна щільність 1700–2000 кг/м³.

Кислотостійкий бетон виготовляють із суміші кислотостійких матеріалів (кварцового щебеню, піску та молотого кремнеземисто-

го заповнювача), що затворені рідким склом з додаванням 10–15 % кремнефтористого натрію (Na_2SiF_6). Твердіння такої суміші відбувається в сухому теплому середовищі. Міцність бетону на 28 добу досягає 15 МПа. Використовують для різних конструкцій і облицювання апаратури в хімічній промисловості.

Кольоровий бетон отримують шляхом уведення в дорожню бетонну суміш лужно- і світлостійких пігментів кількістю 8–10 % від маси цементу. Використовують кольоровий бетон для облицювання пішохідних переходів, паркових доріжок, а також для виготовлення елементів малої архітектури для міського облаштування.

Декоративний бетон виготовляють з використанням білого та кольорового цементу і спеціально підібраних заповнювачів. Його використовують для улаштування дорожніх покриттів, стоянок автотранспорту, пішохідних доріжок, для надання художньої виразності будовам, фасадам і інтер'єрам, а також для облицювання стін і підлоги.

Основним матеріалом для укладання декоративного бетонного покриття є бетонна суміш рухомістю 12 ± 1 см, що утримує щебінь і пісок у співвідношеннях 1:1.

Спеціальна технологія дозволяє наносити на поверхню свіжоукладеного бетону пігментованого порошковидного матеріалу з різними малюнками з подальшим втисненням текстурованих штампів. Після зняття штампів і затвердіння бетону, на його поверхню наносять плівку з акрилового компаунду, яка захищає поверхню від дії бензину, солей і інших агресивних рідин, забезпечує морозостійкість і зносостійкість поверхні декоративного бетону.

7.10. Лита самоущільнювальна бетонна суміш

Лита бетонна суміш самоущільнюється без механічного оброблення під дією власної ваги. Для таких бетонних сумішей характерна підвищена витрата цементу. Вони мають високу рухомість і призначені для обтікання арматури або закладних деталей і повного заповнення конструкції складної конфігурації. Такі суміші схильні до водовідділення і розшарування. Для попередження цих явищ в бетонну суміш вводять спеціальні водоутримувальні домішки (бентонітові глини, кремнезем) і мікронаповнювачі.

Технологічні властивості литих сумішей покращуються за рахунок використання пластифікаторів типу ЛСТ або суперпластифікаторів.

Такі суміші останнім часом широко використовують у збірному та монолітному будівництвах. Їх використання в монолітному будівництві надає таких переваг порівняно з використанням традиційних бетонних сумішей: скорочення часу вібрації бетонної суміші, відмови від віброущільнення, можливості якісного укладання бетону в конструкціях різної конфігурації.

Питання для самоконтролю



1. Що таке бетон, та які його фізико-механічні властивості?
2. За рахунок чого відбувається формування структури цементобетону?
3. На які види поділяють дорожні цементобетони?
4. Які фізико-механічні властивості бетонної суміші?
5. Які деформації характерні для дорожнього цементобетону?
6. Що таке корозійна стійкість бетону?
7. Які матеріали використовують для виготовлення дорожнього цементобетону?
8. Які хімічні домішки використовують у цементобетонних сумішах?
9. Що таке фібро бетон, і які види волокон використовують для дисперсного армування?
10. Назвіть спеціальні види бетонів.

Розділ 8. МАТЕРІАЛИ ДЛЯ РЕМОНТУ ЦЕМЕНТОБЕТОННИХ ПОКРИТТІВ

У процесі експлуатації цементобетонні покриття автомобільних доріг та аеродромів зазнають дії різних негативних факторів – механічного навантаження, корозії, хімічного впливу, заморожування – відтанення. Це призводить до утворення деформацій та їх повного руйнування. Вирішальним фактором для механізму руйнування бетонних котрукцій є сіль і вода. У результаті агресивного впливу води з солями на плити проїзної частини, постійного динамічного впливу транспорту, промерзання взимку і значного перегріву влітку, дії викидів газів і протижеледних матеріалів відбувається розтріскування на цих місцях контакту цементного розчину зі щебенем, вилужування цементного розчину, осадження, зниження зносостійкості, і в результаті – значне зниження терміну служби покриття. При цьому міцність бетону на ділянках, де спостерігається фільтрування води через плиту, знижується на 50–80 %.

Усе це потребує негайного відновлення пошкоджених ділянок шляхом ведення ремонтних робіт. Відомо, що якість і довговічність ремонтів прямо залежить від властивостей матеріалів, які застосовують. Тому використання довговічних ремонтних матеріалів зі стабільними фізико-механічними властивостями є першочерговим завданням науковців і виробників.

Для вирішення завдань виконання ремонтних робіт зі збільшеним терміном служби заслуговує на увагу питання використання матеріалів Five Star Structural Concrete. Застосування матеріалів цієї групи забезпечує:

- високе інтегральне (хімічне) зчеплення нанесеного шару Five Star Structural Concrete з наявною поверхнею. Міцність зчеплення шарів більша ніж 17 МПа. Це дозволяє відновити зношений або пошкоджений шар бетону до його початкової структури. За рахунок хімічного зчеплення після нанесення Five Star Structural Concrete забезпечується підвищена щільність шарів (нового та наявного), що виключає утворення пустот у ремонтному шарі;

- відсутність усадкових деформацій, завдяки тому, що коефіцієнт температурного розширення (K_T) Five Star Structural Concrete відповідний до (K_T) бетонів більшості видів;

– повну непроникність до поверхні бетону води та хімічних речовин, масел та солей;

– високу стійкість до карбонізації і почергового заморожування – відтанення (морозостійкість);

– те, що набір міцності шару із Five Star Structural Concrete відбувається одразу після нанесення його на наявну поверхню. Ця так звана «рання міцність» шару, дозволяє оперативно вести ремонтні роботи під час руху транспорту або без змін режиму польоту літаків. Цю важливу особливість матеріалу необхідно враховувати за необхідності виконання робіт аварійного ремонту;

– те, що ремонтний шар із матеріалів групи Five Star Structural Concrete можна наносити для покращення структури пошкоджених бетонних поверхонь як горизонтальних, так і вертикальних.

Технологія робіт дозволяє ремонтувати пошкоджену поверхню бетону шаром до 300 мм за один прохід. Нанесення шару Five Star Structural Concrete відбувається на суху, очищену поверхню без нанесення підґрунтовки, що значно спрощує і підвищує економічність виконання робіт.

На особливу увагу заслуговують матеріали – цементні розчини Five Star. Вони є безусадковими як у пластичному, так і в твердому стані, забезпечують повне витискання повітря в просторі, що ремонтують, і при цьому забезпечують значну ефективну несучу площу ремонту – міцну та довговічну. Такі розчини, завдяки їх властивості не змінювати об'єм, раціонально використовують для ремонту цементобетонних плит, для їх піднімання внаслідок просядань і вирівнювання внаслідок здимання, а також для заливання проміжку між основою і несучою плитою фундаменту для встановлення різного обладнання. Використання розчинів Five Star забезпечує 100 % вирівнювання поверхні плит і довговічність виконаних робіт.

Ця група матеріалів включає такі різновиди:

– Five Star Structural Concrete – це однокомпонентний ремонтний матеріал з високою ранньою міцністю і низькою усадкою, стабільних розмірів, забезпечує достатньо інтегроване зчеплення з бетонною поверхнею та відновлює її структурні властивості через кілька годин після укладання, характеризується довговічністю.

– Five Star Structural Concrete ES (Extended Set) – це однокомпонентний ремонтний матеріал зі збільшеним терміном тужавіння

(близько 45 хв), що дозволяє виконувати значний обсяг ремонту за одне укладання, стабільним за розміром, забезпечує інтегроване зчеплення з бетонною поверхнею, відновлює структурні властивості ремонтovanого бетону за кілька годин після нанесення, хімічно стійкий.

Особливо ефективно використання цього матеріалу для реконструкції фундаментів під обладнання. Шар покриття на нього може бути нанесений менш ніж за 24 год після укладання шару з Five Star Structural Concrete ES.

– Five Star Structural Concrete V/O – однокомпонентний ремонтний матеріал для вертикального нанесення, стабільних розмірів, створює інтегроване зчеплення з наявною бетонною поверхнею, відновлює її структурні властивості за кілька годин після укладання; хімічно стійкий, характеризується дуже низькою проникністю до іонів хлору, водостійкий матеріал, шар покриття на нього в умовах підвищеної вологості може бути нанесений за 8–24 год.

Висока температуростійкість і морозостійкість цементних розчинів Five Star дозволяє використовувати їх у широкому діапазоні температур незалежно від погодно-кліматичних умов.

Дослідження американського інституту бетону (ACI) довели надійність і довговічність цементних розчинів Five Star більш ніж за 50 років.

Безусадкові цементні розчини Five Star Cement Grouts можуть бути таких видів:

– Five Star Grout – прецизійний безусадковий розчин для використання сухої або текучої консистенції, з подовженим терміном тужавіння. За значних обсягів робіт у розчин можна додавати заповнювач, змішування виконують міксером (автомобільним).

– Five Star Grout 100 – прецизійний високоміцний, безусадковий розчин, рідкої консистенції для виконання робіт незначного обсягу, можливе подавання розчину на значну відстань.

– Five Star Instant Grout – прецизійний безусадковий розчин високої ранньої міцності (міцність за 4 години після укладання – 27 МПа). Морозостійкий, можливе укладання за температури до – 20 °С.

– Five Star HTR Grout – прецизійний безусадковий розчин високої ранньої міцності. Пропонований для використання за підвищених температур експлуатації (можливо навіть за 1300 °С).

– Five Star Special Group 120 – прецизійний безусадковий розчин для заливання місць ремонту поверхневого впливу сольових розчинів і води.

– Five Star Special Group 150 – прецизійний безусадковий сульфатостійкий розчин для вирівнювання дорожніх плит та високоточного обладнання.

– Five Star Special Group 550 – перший прецизійний безусадковий розчин на цементній основі, розроблений для ведення дорожніх і аеродромних ремонтних робіт, з укладанням до температури + 46 °С без використання води чи льоду.

Наведені сучасні матеріали Five Star Structural Concrete і Five Star Cement Grouts уже застосовують в Україні для ліквідування деформацій та руйнувань цементобетонного покриття доріг і аеродромів із забезпеченням ефективності та технологічності виконання робіт.

Розділ 9. СТРУКТУРА ТА ВЛАСТИВОСТІ КОМПОЗИЦІЙНИХ ДОРОЖНЬО-БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ОРГАНІЧНИХ В'ЯЖУЧИХ РЕЧОВИН

9.1. Складові компоненти асфальтового бетону

Головним композиційним матеріалом на основі органічних в'язучих речовин – бітумів є асфальтовий бетон (асфальтобетон).

Асфальтобетон – це матеріал, що отримують у результаті ущільнення спеціально приготованої суміші зі щебеню або гравію, піску, мінерального порошку та бітуму в раціонально підібраних співвідношеннях, який набуває необхідних фізико-механічних властивостей лише після ретельного ущільнення. Унаслідок поєднання мінеральних матеріалів з бітумом відбуваються складні фізико-хімічні процеси, характер яких залежить від властивостей і особливостей складових матеріалів. Взаємодія в'язучої речовини і мінерального матеріалу є важливим фактором, що визначає властивості асфальтобетону.

Асфальтобетон являє собою один з найбільш складних будівельних матеріалів. Ця складність зумовлена головним чином особливостями його структури, а також залежністю властивостей від дії багатьох факторів – технологічних і природних. Асфальтобетон значно змінює фізико-механічні властивості залежно від температури. Це відрізняє його від більшості інших матеріалів, які застосовують для укладання дорожніх покриттів. За позитивних температур він має властивості в'язко-пластичного тіла, а за від'ємних – пружного. Зміна властивостей може бути проілюстрована таким прикладом: опір стисканню стандартних зразків за температури 50 °С зазвичай коливається в межах 1–2 МПа, а у разі температури 25 °С – 4–6 МПа, тобто у разі зниження температури стає значно міцнішим. Зміни температури значною мірою впливають на деформаційні властивості асфальтобетону, які головним чином і визначає його працездатність у дорожньому покритті.

Скелетна частина асфальтобетону складається з різних фракцій гранітного щебеню. Мінеральний порошок являє собою продукт

грубого подрібнення вапняків у молоткових дробарках, у якому дрібність фракцій 0,071 мм у ньому міститься не менш ніж 70 %. Як в'язучу речовину використовують нафтовий бітум високої в'язкості (глибина проникання голки 60–90, 90–130).

Нині для виробництва асфальтобетону широко використовують відходи та інші місцеві матеріали, які отримують унаслідок дроблення каменю (гранітний відсів), а також дрібні піски. Усе це знижує вартість асфальтобетонної суміші, але вимагає ретельніше вибирати матеріали і добирати склад сумішей, а також більш диференційовано застосовувати асфальтобетонні суміші різного складу. Для відповідальних об'єктів (автомобільні шляхи I-II категорії і аеродроми) слід обирати найбільш високоякісні асфальтобетони, які мають відповідні фізико-механічні властивості, а для менш відповідальних (автомобільні шляхи III-IV категорій) – використовувати асфальтобетони з нижчими показниками міцності, водо- та морозостійкості.

У 1959 році вперше був уведений ГОСТ на асфальтовий бетон, згідно з яким цей матеріал був виділений із загальної групи бітумо-мінеральних сумішей за двома ознаками: якість мінеральних матеріалів, які використовують, і точність їх дозування. Нині існують ДСТУ на гарячий і холодний асфальтобетони, які класифікують за різними ознаками.

Сучасні дослідження в галузі асфальтового бетону спрямовані на вивчення і регулювання молекулярних процесів, які відбуваються внаслідок взаємодії різнорідних компонентів, що складають суміші, з допомогою яких можна пояснити і, що найголовніше, оптимізувати макроскопічні властивості цього матеріалу.

До таких робіт відносять дослідження молекулярної структури бітуму та його властивостей у тонких шарах та способів регулювання процесів взаємодії бітуму з мінеральними матеріалами.

Усе це посприяло підвищенню технічного рівня будівництва асфальтобетонних покриттів. Однак, зі зростанням інтенсивності руху стають усе більш очевидними головні недоліки асфальтобетонів, які застосовують нині, – недостатня корозійна та деформаційна стійкості, а також водо- і морозостійкість, з якими пов'язана значна кількість руйнувань асфальтобетонних покриттів, особливо у весняний період.

Умови руху сучасних транспортних засобів ставлять завдання суттєвого збільшення довговічності асфальтобетонних покриттів. Вирішення цього завдання пов'язане з необхідністю докорінного покращення властивостей використовуваних матеріалів, а у багатьох випадках – із необхідністю заміни традиційних матеріалів новими.

У всіх розвинених країнах проводять дослідження, спрямовані не тільки на покращення властивостей нафтових бітумів (за рахунок покращення вихідної сировини), але й на створення на їх основі нових в'язучих матеріалів, наприклад, різних бітумополімерних композицій.

В Україні застосовують технологію виробництва асфальтового бетону, що передбачає використання в ньому мінеральних матеріалів, які підлягають попередній фізико-хімічній активації і введенню в бітум полімерних домішок. Це забезпечує збільшення якості та довговічності асфальтобетонних покриттів за рахунок активного регулювання структурно-механічних властивостей асфальтобетону і спрямованого структуроутворення матеріалу, у результаті штучної зміни поверхні реакції мінеральних часток.

9.2. Фізико-хімічні процеси структуроутворення асфальтового бетону

Структуру асфальтового бетону характеризують величина, форма, характер поверхні та кількісне співвідношення мінеральних зерен, їх взаємне розташування, характер внутрішніх зв'язків між ними та в'язучою речовиною (бітумом).

Асфальтовий бетон характеризує коагуляційна структура, яка відрізняється яскраво вираженими пластичними властивостями.

Проф. П. В. Сахаров вперше запропонував розглядати асфальтовий бетон як матеріал, що складається з двох частин – кам'яного остову (скелету) і асфальтов'язучої речовини (суміш бітуму та мінерального порошку). Таким чином, структура асфальтового бетону являє собою кам'яний остов, що складається зі щебеню або гравію, у проміжках між якими знаходяться зерна піску. Кам'яний остов і пісок поєднані між собою асфальтов'язучою речовиною (рис. 9.1).



Рис. 9.1. Структура асфальтового бетону (зріз)

Інші дослідники зазначають, що структура асфальтобетону може бути каркасною, напівкаркасною і безкаркасною (рис. 9.2).

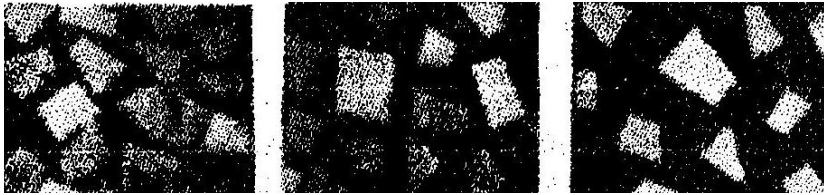


Рис. 9.2. Схема структури асфальтобетону

Каркасною називають структуру, мінеральний остов якої складається із щільно пакованого щебеню (вміст не менш ніж 50–65 %), порожнин якого заповнені асфальтовим розчином (асфальтов'язуча речовина та пісок). Об'єм асфальтового розчину не перевищує об'єму порожнин у щебені (рис. 9.2, *a*), а крупні зерна піску не більші за розмір порожнин каркасу і не розсувають його зерен ні своїм розміром, ні об'ємом.

За такої структури об'єм щебеню в ущільненому асфальтобетоні дорівнює об'єму самого асфальтобетону, а зерна заповнювальної суміші дрібніш ніж 0,063 мм (рис. 9.2 *a*). Зазвичай, це суміші переривчастої гранулометрії, у яких відсутні зерна розміром від 5 до 0,63 мм.

Перевага каркасного мінерального остову полягає у його забезпеченні високих зсувних характеристик асфальтобетону: чим більше щебеню в асфальтобетоні, тим більший його опір зсуву.

Напівкаркасною називають структура, мінеральний остов якої містить зерна щебеню, що частково розсунуті збільшеним об'ємом асфальтового розчину (рис. 9.2, б).

Безкаркасною називають структуру, мінеральний остов якої такий, що зерна щебеню розсунуті об'ємом заповнювальної суміші, та зерна щебеню наче плавають у пластичній, розчинній частині асфальтобетону (рис. 9.2, в). Вміст зерен щебеню, крупніших за 5 мм, 20–35 % за масою.

Текстуру асфальтобетону визначають за розміром і характером розміщення структурних елементів у поверхневому шарі матеріалу. Текстура визначає експлуатаційні властивості асфальтобетонного покриття: зносостійкість, шорсткість, шумність. Текстура може бути гладкою, мікро-, середньо- та грубошорсткою.

Напруги, що виникають в асфальтобетонному покритті, цілком залежать від транспортного навантаження і не залежать від виду його структури. Різниця полягає в тому, які напруги за видом і величиною виникають у покритті і на складових компонентах асфальтобетону.

У покриттях із каркасного асфальтобетону напруги від коліс транспортного засобу передаються від зерна до зерна по площині контакту. З'являється тиск від транспортних засобів, тертя і зачеплення між зернами. Міцність і стійкість покриття при цьому залежать від механічних властивостей зерен щебеню (міцність на стискання, зношування і розколювання). Бітумна плівка на мінеральних зернах забезпечує об'єднання окремих зерен у моноліт, але її механічні властивості не мають вирішального значення. Такий тип сумішей використовують у нижньому шарі покриття та основі.

У покритті з безкаркасного асфальтобетону напруги від колеса передаються на розчинну частину. Для попередження деформацій використовують високов'язкий бітум (БНД 90/130), більшу кількість щебеню, крупнішого за 5 мм (вміст мінерального порошку теж зростає). Мінеральний порошок структурує бітум, збільшуючи його температуростійкість.

Усі асфальтобетонні суміші за умовами прийняття навантаження знаходяться в межах цих видів асфальтобетону. За значеної кількості щебеню напруги сприймає каркас (скелет) із мінеральних зерен, тому вимоги до механічних властивостей щебеню повинні бути достатньо високими. За безкаркасної структури механізм роз-

поділу напруг відбувається по розчинній частині, тут міцність щебеню не є головною.

На забезпечення зсувостійкості асфальтобетону, головним чином, впливає кількість і механічна міцність саме щебеню. Вплив щебеню коливається залежно від його просторового розташування, співвідношення між сумарним об'ємом щебінок і об'ємом простору між зернами, заповненими асфальтовим розчином.

Ці співвідношення у стандартизованих складах наведені в табл. 9.1.

Таблиця 9.1

Співвідношення між сумарним об'ємом щебінок та об'ємом простору між зернами, заповненими асфальтовим розчином

Щебінь і пустоти	Вміст щебеню в суміші за масою, %			
	20	35	50	65
Сумарний об'єм зерен щебеню в асфальтобетоні, %	10	30	43	56
Об'єм міжщебеневого простору, заповненого асфальтовим розчином	90	70	57	44

Уміст щебеню і мінерального порошку і їх співвідношення не тільки визначають структуру мінерального остову й асфальтобетону (головним чином пористість і каркасність), але, окрім того, різниця в структурі помітно змінює і властивості асфальтобетону, що видно з таких прикладів.

За максимального вмісту щебеню 65 % і за 4 % мінерального порошку пористість мінерального остову може дорівнювати 15 %. На заповнення цих пор необхідно 5 % бітуму, $4+5=9$ % асфальтов'язучого малої концентрації ($4:5=0,8$). Такі кількості складових компонентів забезпечать асфальтобетону високу тріщиностійкість, а вміст щебеню 65%, утворюючи просторовий каркас, забезпечить високу зсувостійкість.

За мінімального вмісту щебеню 20 % і 14 % мінерального порошку пористість мінерального остову може зростати до 22 %. Для заповнення пустот мінерального остову необхідно 7 % бітуму, кількість асфальтової в'язучої речовини зростає до $14+7=21$ %, його концентрація збільшується до $14:7=2$, що зменшує тріщиностійкість, а внаслідок малого вмісту щебеню знизиться і зсувостійкість.

Таким чином, загальне порівняння традиційних асфальтобетонних сумішей і роз'яснення механізму їх опору та розподілення напруг від коліс транспортних засобів дозволяють аналізувати поведінку асфальтобетону в покритті протягом експлуатації і правильно рекомендувати ту чи іншу суміш для конкретних умов.

9.3. Особливості формування структури асфальтового бетону

Формування і монолітності структури асфальтового бетону досягають у процесі перемішування складових і їх ущільнення. У результаті перемішування відбувається обволікування поверхні зерен кам'яного остову тонкою плівкою асфальтов'язучої речовини. За ущільнення складові частки наближуються, склеюються, і суміш перетворюється в єдиний матеріал, що має визначені фізико-механічні властивості. Взаємний зв'язок і зчеплення мінеральних складових часток асфальтового бетону, відбувається завдяки внутрішньому тертю між ними і з'єднанню їх бітумом в місцях взаємного доторкання.

Застосування кожного складового матеріалу в асфальтовому бетоні зумовлена його визначеними характеристиками. Щебінь є остовом асфальтового бетону. Пісок заповнює проміжки між щебіньками і збільшує поверхню зчеплення бітуму зі щебеними мінеральними матеріалами. Особливе значення має мінеральний порошок, який є головною структуроутворювальною складовою асфальтов'язучої речовини. Зі збільшенням кількості мінерального порошку в'язкість асфальтов'язучої речовини значно зростає. Дослідження к.т.н. І. М. Борщ показали, що за концентрації мінерального порошку в асфальтов'язкій речовині від 60–80 % утворюється просторова структурна решітка зі значним збільшенням механічної міцності системи. За концентрації мінерального порошку до 60 % властивості суміші зумовлені переважно властивостями бітуму та впливом мінерального порошку на механічні властивості асфальтов'язучого та асфальтобетону, украй незначним.

Завдяки великій площині питомої поверхні та високій адсорбційній здатності мінеральний порошок збільшує кількість контактів між мінеральною частиною і бітумом, унаслідок чого збільшуються сили зчеплення часток, і утворюється стійка асфальтов'язуча

речовина, яка міцно зв'язує ці частки та забезпечує міцність асфальтового бетону.

Окрім того, міцність зв'язування мінеральних часток у суміші залежить від тонкості бітумної плівки.

З теорії поверхневих явищ відомо, що тонкі шари рідких чи в'язучо-рідких матеріалів, нанесених у вигляді клейкої змазки на поверхні з'єднаних твердих тіл, утворюють міцний зв'язок між ними. Тому міцність «зклеювання» мінеральної частини асфальтового бетону з бітумом буде мати місце за оптимальної тонкості бітумної плівки. Ця тонкість бітумної плівки створюється введенням до складу асфальтобетонної суміші мінерального порошку.

Завдяки застосуванню мінерального порошку утворюється мікропориста структура асфальтобетону, у якій бітум, знаходячись у тонких прошарках і дрібних порах, потрапляє в зону впливу молекул поверхневого шару мінеральної частини. Окрім того, мінеральний порошок стабілізує фізико-механічні властивості бітуму, у результаті чого вони менше змінюються під впливом температури, тобто підвищується його термостійкість і асфальтов'язучого.

Таким чином, призначення мінерального порошку в асфальтовому бетоні виявляється в:

- формуванні міцної структури асфальтов'язучої речовини;
- збільшенні поверхні та міцності зчеплення мінеральної частини та бітуму;
- забезпеченні оптимальної тонкості бітумної плівки;
- підвищенні щільності, водостійкості та теплостійкості асфальтового бетону;
- стабілізуванні властивостей бітуму й асфальтов'язучої речовини;
- утворенні дрібнопористої структури.

9.3.1. Фізико-хімічна взаємодія мінерального порошку з бітумом в асфальтовому бетоні

Мінеральному порошку належить значна роль у регулюванні процесу взаємодії бітуму з мінеральними матеріалами. Завдяки високо розвинутій питомій поверхні (на частку мінерального порошку припадає до 90–95 % від сумарної поверхні зерен, що входять до складу асфальтобетону) мінеральний порошок сприяє збільшенню кількості контактів між структуроутворювальними

компонентами асфальтобетону. Основне призначення мінерального порошку полягає в тому, щоб переводити бітум з об'ємного стану в плівковий і стабілізувати його властивості під дією високих і низьких температур. У плівковому стані бітум набуває підвищеної міцності та в'язкості, а внаслідок стабілізуючої дії мінерального порошку менше змінює свої властивості під впливом температури. Разом з бітумом мінеральний порошок утворює структурувальну дисперсну систему, так звану «асфальтов'язучу речовину», яка забезпечує високі міцнісні і деформативні властивості асфальтобетону.

Чим більша питома поверхня мінерального порошку, тим більшою мірою виявляється його структуроутворювальна дія на бітум і асфальтобетон. Однак дуже високу дисперсність мінеральних порошоків часто не реалізують в асфальтобетоні внаслідок агрегагування найдрібніших частинок. Утворені таким чином агрегати не тільки зменшують питому поверхню порошку, але й зменшують густину та корозійну стійкість асфальтобетону. Оптимальною вважають таку дисперсність порошку, за якої питома поверхня становить 4000–5000 см²/г.

Інше призначення мінерального порошку – заповнення дрібних пор між крупнішими частинками. Недостатня кількість мінерального порошку призводить до отримання асфальтобетону недостатньої щільності, що викликає погіршення експлуатаційних властивостей.

Мінеральний порошок має природну активність, зумовлену активністю кам'яних матеріалів, з яких його виготовляють, і може бути активований штучно (рідким бітумом) під час мелення.

Асфальтобетони зі штучно активованими мінеральними порошками відрізняються вищими показниками теплостійкості ніж звичайні (з традиційними). Навіть на малов'язучих бітумах ці асфальтобетони характеризують високі показники міцності за температури 50°C. Вони є менш бітумовмісними. Витрати бітуму зменшуються середньо на 20–30 %. У разі використання бітумополімерних в'язучих речовин витрати бітуму зменшуються на 30–35 %.

Міру зміни міцності асфальтобетону як і міру зниження витрат бітуму можна регулювати властивостями активованого мінераль-

ного порошку, а також його кількістю в асфальтобетонній суміші. Необхідні фізико-механічні властивості асфальтобетону та вміст у ньому бітуму повинні призначатись відповідно до кліматичних і експлуатаційних умов. Можливість регулювання кількості об'ємного бітуму в асфальтобетоні має важливе значення. Так, для районів з надлишковим зволоженням для підвищення водостійкості асфальтобетону та корозійної стійкості покриттів кількість об'ємного бітуму повинна бути більшою, ніж для районів зі спекотним кліматом.

Мінеральні порошки виготовляють відповідно до вимог ДСТУ Б В.2.7-121-2003 згідно з технологічними регламентами, затвердженими у встановленому порядку.

За впливом складу мінеральних порошоків на їх природну активність, їх поділяють на чотири групи.

– Перша має високий позитивний потенціал і значну кількість адсорбційних центрів у вигляді катіонів Ca^{2+} та Mg^{2+} (кальцит, вапняк, доломіт). Характеризується найбільшою активністю, завдяки хемосорбційним зв'язкам. Бітумні плівки міцно утримуються на поверхні мінеральних зерен, надаючи дисперсній системі «бітум-мінеральний порошок» підвищеної міцності і водостійкості.

– Друга має поверхню зерен з негативним знаком заряду та значну кількість адсорбційних центрів у вигляді іонів O_2^- (кварц, каолін, граніт, кремій). Ці мінеральні порошки викликають зворотне явище – негативну адсорбцію. Частинки порошку в цьому разі тільки механічно заповнюють мікоропорожнини бітумної просторової сітки. Бітум, який їх обволікує, утримується на поверхні дуже слабко. Суміш бітуму з такими мінеральними порошками вирізняється недостатньою міцністю, значною пластичністю та зниженою водостійкістю.

– Третя має занижений потенціал негативного знаку заряду внаслідок наявності на поверхні частинок компенсувальних катіонів різної валентності K^+ , Na^+ , Ca^+ , Mg^+ (слюда, азбест, габро, польовий шпат). Може бути активною і неактивною залежно від переважання тих чи інших катіонів. Якщо гірська порода містить багато три- і двовалентних катіонів Mg^{2+} , Ca^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} (діабаз, габро), то їх суміш з бітумом буде мати високу міцність і знижену

пластичність. Навпаки, за збільшення одновалентних катіонів K^+ , Na^+ (слюда, польовий шпат) система буде характеризуватись зниженими механічними властивостями та збільшеною пластичністю.

– Четверта група має нейтральну поверхню (тальк, графіт тощо). Поверхня нейтральна дає ефективність, дії відбуваються тільки у разі безпосереднього контакту мінеральних зерен, не знижує полярності бітуму. Оскільки поверхнева активність речовин бітуму внаслідок наповнення таким порошком залишається вільною, відбувається інтенсивне солюбілізуванню суміші.

Водостійкість бітумних плівок на поверхні мінерального матеріалу суттєво зростає зі зменшенням кількості частинок мінерального порошку з негативним зарядом поверхні та зростанням сумарної кількості зерен порошку з нейтральним та позитивним зарядами.

Отже, нейтральні та позитивно заряджені частинки мінерального порошку позитивно впливають на формування міцних адгезійних зв'язків, які визначають тривалу водостійкість асфальтобетону.

Хімічний склад сировинних матеріалів для приготування мінеральних порошоків наведений в табл. 9.2.

Таблиця 9.2

Хімічний склад матеріалів, %

Назва матеріалу	CaCO ₃	MgCO ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃
Вапняк (Скала-Подільськ)	85,0	7,7	1,2	0,7	4,4	–
Вапняк (Закупне)	99,3	0,2	0,2	0,1	0,1	–
Вапняк (Тягине, маломіцний)	CaO–52,5	0,7	1,3	1,5	9,0	–
Вапнякові «хвости» флотажі сірки	73,0	0,7	0,3	–	4,8	13,5
Гранітний відсів (Запорізька обл.)	CaO–1,8	MgO–1,3	14,3	–	37,7	–
Кварцит (Овруч)	–	–	1,2	0,7	97,0	–
Шлак відвальний доменний	CaO–49,0	MgO–2,5	9,0	1,2	35,2	2,1

Фізико-механічні властивості сировинних матеріалів для приготування мінеральних порошоків наведені в табл. 9.3.

Таблиця 9.3

Фізико-механічні властивості матеріалів

Матеріали	Фізико-механічні властивості		
	межа міцності на стиск, МПа	дійсна густина, г/см ³	середня густина, г/см ³
Вапняк (Скала-Подільськ)	120,0	2,72	2,70
Вапняк (Закупне)	70,0	2,59	2,40
Вапняк (Тягино, маломіцний)	15,0	2,68	2,15
Вапнякові «хвости» флотації сірки	-	2,85	1,84
Гранітний відсів (Запорізька обл.)	6-7	2,62	2,40
Кварцит (Овруч)	100,00	2,65	2,02
Шлак відвальний доменний	320,0	2,91	2,47

Гранулометричний склад і властивості мінеральних порошків, виготовлених з цих сировинних матеріалів, наведені в табл. 9.4.

Таблиця 9.4

Гранулометричний склад і властивості мінеральних порошків

Найменування показника	Вид порошку						
	Скала-Подільський вапняк	Закупнянський вапняк	Тягинський вапняк	«Хвіст» флотації сірки	Гранітний відсів	Кварцит Овруцький	Шлак відвальний
Вміст частинок за масою, < 0,071 мм < 1,25 мм	78	69	70	78	70	70	70
	100	100	100	100	100	100	100
Пористість за ущільнення 40 МПа, % за об'ємом	28	25	27	26	19	22	20

Закінчення табл. 9.4

Найменування показника	Вид порошку						
	Скала-Подільський вапняк	Закупнянський вапняк	Тягинський вапняк	«Хвіст» флотації сірки	Гранітний відсів	Кварцит Овруцький	Шлак відвальный
Набрякання зразків сумішей порошоків з бітумом, % за об'ємом	2,4	2,1	2,5	3,2	0,9	1,8	1,5
Показник бітумоємності, г/см ³	50	60	65	53,4	20	55	10

Властивості асфальтов'язучої речовини, виготовленої з використанням випробуваних мінеральних порошоків і бітуму з додаванням полімерів і без них наведені в таблиці 9.5.

Таблиця 9.5

**Властивості асфальтов'язучої речовини
й асфальтополімерв'язучої речовини**

Вид мінерального порошку	Результати випробувань					
	В'язкість за 25 °С, 0,1 мм		Розтяжність за 25 °С, см		Температура розм'якшеності, °С	
	На немодиф. бітумі	На модиф. бітумі	На немодиф. бітумі	На модиф. бітумі	На немодиф. бітумі	На модиф. бітумі
Вапняковий (Скала-Подільськ)	30,2	23,7	10,0	15,9	55,0	63,7
Вапняковий (Закупне)	34,8	29,5	9,0	14,1	55,2	59,0
Вапняковий (Тягино, мало-міцний)	34,0	28,7	9,7	15,9	56,2	61,2

Закінчення табл. 9.5

Вид мінерального порошку	Результати випробувань					
	В'язкість за 25 °С, 0,1 мм		Розтяжність за 25 °С, см		Температура розм'якшеності, °С	
	На немодиф. бітумі	На модиф. бітумі	На немодиф. бітумі	На модиф. бітумі	На немодиф. бітумі	На модиф. бітумі
Вапнякові «хвости» фло-тації сірки	50,3	38,8	14,8	20,9	49,5	53,7
Гранітний відсів (Запорізька обл..)	32,6	33,0	11,7	24,6	55,2	60,5
Суміш 75 % вапняку з 25 % гранітного відсіву	42,6	24,3	12,6	15,2	54,6	61,5
Суміш 50 % вапняку з 50 % гранітного відсіву	39,0	31,7	10,3	11,2	55,0	61,2
Суміш 25 % вапняку з 75 % гранітного відсіву	33,6	23,5	14,8	12,1	55,5	61,0
Кварцит (Овруч)	32,1	27,2	13,2	17,1	55,7	62,5
Шлак відвальний доменний	30,2	29,0	22,0	19,9	55,2	67,2

Результати випробувань асфальтов'язучої речовини та асфальтополімерної в'язучої речовини на основі різних мінеральних порошків наведені в табл. 9.5, свідчать, що:

– мінеральні порошки внаслідок змішування з модифікованим бітумом утворюють більш структуровану асфальтополімербітумну в'язучу речовину, ніж асфальтов'язуча речовина за використання немодифікованого бітуму;

– структуроутворення асфальтополімербітумного в'язучої речовини (на основі модифікованого бітуму), більшою мірою залежить від пористості та природи мінерального порошку, ніж структуроутворення асфальтов'язучої речовини у разі застосування немодифікованого бітуму;

– порівняно з органічними в'язучими асфальтов'язучу речовину та асфальтополімербітумну в'язучу речовину характеризують значно більша в'язкість, вища теплостійкість та мала розтяжність за 25 °С;

– порівняно вища теплостійкість асфальтополімербітумної в'язучої речовини на основі відвального шлаку зумовлена високим вмістом заліза у вигляді окислів Fe_2O_3 , що є каталізатором подальшої полімеризації модифікованого бітуму;

– наявність у вапнякових «хвостах» флотації сірки значного вмісту водорозчинних сполук у вигляді сульфатів (13,5 %) зумовлює пластифікування в'язучої речовини і протидіє структуруванню асфальтов'язучої та асфальтополімербітумної в'язучих речовин.

9.3.2. Особливості технології активації мінерального порошку

Активация мінерального порошку відбувається під час мелення за рахунок оброблення свіжоутворених поверхонь бітумом з уведеннями ПАР у кількості 1,5–3,0 % від маси порошку. Частіш за все активують поверхню вапнякового мінерального порошку, для поліпшення адгезії у разі використання мінеральних матеріалів кислих порід.

Активация мінерального порошку зумовлює створення на мінеральних зернах первинного контактного шару високоструктурованого бітуму, який змінює (поліпшує) властивості мінерального порошку й асфальтобетонів на його основі.

Протягом активації на поверхні мінерального порошку з'являються хімічні зв'язки, які ведуть до збільшення міцності, тепло-, водо- та морозостійкості асфальтобетону та нежорсткого дорожнього покриття впродовж експлуатації.

Під час активації свіжоутворена поверхня краще сорбує бітум внаслідок появи на ній нових ненасичених валентних зв'язків, іонів і активних центрів.

Для активації мінерального порошку використовують гідрофобізувальні ПАР – високомолекулярні органічні (карбонові) кислоти і їх солі у вигляді розчинів. Для збільшення прилипання бітуму до кислих порід (піски) поверхні мінеральних порошоків обробляють розчинами електролітів, вапном, цементом. Ефект активації залежить від вологості мінерального матеріалу, його мінералогічного складу та кількості активатора, звичайно, 0,5–1,5 % від маси мінерального матеріалу. Навіть, пісок, з утвореним на його поверхні гідросилікатами кальцію, реагує з бітумом, у який додані ПАР.

При цьому зміцнюються зв'язки бітумної плівки з мінеральною поверхнею, що сприяє підвищенню водостійкості асфальтобетону, збільшується в'язкість асфальтов'язучої речовини, що підвищує теплостійкість асфальтобетону.

Активація мінерального порошку може здійснюватись уведенням (розпиленням) протягом мелення дьогтів і пеків у кількості не більшій як 15 % від маси порошку.

Так, позитивний результат забезпечує введення дьогтю кількістю 0,4–0,6 %, торф'яного пилу – 5 %, кам'яновугільного пеку – 0,2 % і торф'яного дьогтю – 0,25 % від маси порошку.

Торф'яні та деревинні дьогті краще ніж кам'яновугільні суміщуються з бітумом. Додавання їх до бітумів збільшує водостійкість асфальтенів. Попереднє оброблення поверхні мінеральних матеріалів 10 % емульсією деревинного пеку і 0,01 % розчином хлористого заліза, хлориду та гідроксиду кальцію дає відмінне прилипання бітуму до кварцового та гранітного щебенів.

Активація може відбуватись сумісним уведенням катіонних домішок до бітуму, % за масою бітуму – 0,05–0,15 та аніонних, наприклад, залізних солей вищих карбонових кислот кількістю 0,2–0,5 % від маси бітуму.

Замість додавання поверхнево-активних речовин значної активації мінеральної поверхні можна досягти за рахунок ультразвукового оброблення бітуму. Таке оброблення викликає появу активних зв'язків у асфальтенів бітуму, які не беруть участі в адсорбції. Це більш виявляється в рідких бітумах.

Окрім бітуму, активацію поверхні мінерального порошку можна виконувати подрібненням (чи меленням) мінеральних порошоків у млинах з додаванням твердофазних полімерних відходів у вигляді гранул, стружки тощо. При цьому відбувається приживлення

полімеру до мінеральної поверхні за рахунок появи вільних радикалів, за розриву решітки радикалів внаслідок мелення. Шар полімеру є дискретним за характером, знижує агрегатність (грудкування) мінерального порошку, сприяє збільшенню дисперсності та рівномірності його розподілення в органічній в'язучій речовині (бітумі), а також зміцненню сил взаємодії мінеральних зерен з бітумом. Кількість уведення полімеру залежить від його різновиду, типу мінерального порошку (режиму та часу подрібнення) і складає 1–3 % від маси мінерального порошку.

Залежно від природи мінерального матеріалу можна додавати інші активатори кількістю 1,5–2,5 % від маси, наприклад:

- для мінерального порошку з глинистих вапняків – смоли ГКЖ-94 низькотемпературного оброблення, буре вугілля, сланці;
- мергелястих вапняків – сланцевий дьоготь;
- доломітизованих вапняків – жировий гудрон та бітум БН-II у співвідношенні 1:1;
- гідрофобізованого вапна – бітум БНД 90/130.

За такою самою технологією можна активувувати (модифікувати) поверхню зерен піску.

Піщані асфальтобетони, виготовлені з використанням активованого піску, іноді можуть замінювати щебеневі; їх використовують для укладання в нижніх шарах покриття.

Активацією поверхні можливо значно покращити фізико-механічні властивості так званих «некондиційних матеріалів». До них відносять дрібні піски (зокрема одномірні), запаси яких перевищують запаси середньо- та крупнозернистих пісків у десятки разів, леси, пилоподібні ґрунти, пиловидні відходи промисловості, глинисті вапняки, гранітні висівки, гравійні матеріали.

Питання для самоконтролю



1. Що таке асфальтовий бетон (асфальтобетон)?
2. Яким буває асфальтобетон за структурою?
3. Як відбувається структуроутворення в асфальтовому бетоні?
4. Яка роль мінерального порошку в асфальтовому бетоні?
5. Як відбувається активація мінерального порошку?

Розділ 10. ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНІ РЕЧОВИНИ

10.1. Структура поверхнево-активних речовин

Поверхнево-активні речовини (ПАР) – це речовини, які впродовж розчинення, у незначних концентраціях, знижують поверхневий натяг розчинника, тобто є поверхнево активними.

Поверхнево-активні речовини, уведені навіть у дуже малих кількостях (0,5–1,0 % від маси в'язучої речовини) різко змінюють характер зв'язків бітуму з поверхнею мінерального матеріалу, що позитивно впливає на будівельні властивості бітумомінеральних матеріалів, і перш за все, на їх водостійкість. Ця здібність ПАР зумовлена силами, що діють на міжфазній межі.

З позицій фізико-хімії ПАР – це органічні сполуки, молекули яких складаються з полярної групи (наприклад, OH, COOH, NH₂) і неполярного вуглеводного ланцюга (радикалу).

Частіш за все у складі ПАР присутні такі функціональні групи: гідроксильні, аміногрупи, карбоксильні, нітрогрупа, карбонільні, сульфогрупа, альдегідна група, нітрозогрупа, гідрозогрупа та інші.

До складу ПАР входять галогени (–Cl, –Br, –F, –I), кисень (–O⁻), азот (N⁻), сірка (–S⁻) і метали (–Me), які можуть виконувати роль функціональних груп. Хімічні та фізичні властивості ПАР залежать від того, яка з функціональних груп приєднана до вуглеводного радикалу.

Позначення ПАР складається з риски – неполярного радикала та кола – полярної групи.

Хімічна структура найбільш поширених ПАР наведена на рис. 10.1.

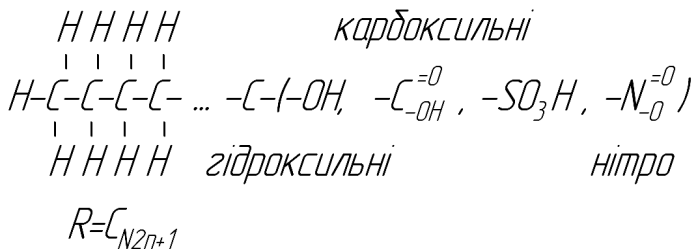
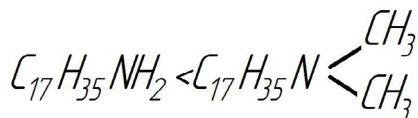


Рис. 10.1. Хімічна структура ПАР

Активність ПАР зростає тим сильніше, чим довшим буде аліфатичний ланцюг, тобто $C_{11}H_{25}NH_2 < C_{15}H_{31}NH_2 < C_{17}H_{35}H_2$ (відповідно ундециловий, пентадециловий, гептадециловий аміни), а також якщо водень функціональної групи замінюють алкільними групами (особливо метильними):



За однієї і тієї самої хімічної структури радикалу поверхня ПАР збільшується залежно від типу функціональних груп, які характеризує величина ступеня полярності.

ПАР залежно від кількості функціональних груп можуть бути одно- дво- та багатоосновними: $RCOOH$ – одноосновна карбонова кислота, $HOOCRCOOH$ – двоосновна карбонова кислота, NH_2RNH_2 – двоосновний амін. Радикалами можуть бути не тільки насичені аліфатичні вуглеводні сполуки з відкритим ланцюгом атомів типу C_nH_n , C_nH_{2n-2} , C_nH_{2n-4} , але й циклічні сполуки із замкненим (кільцевим) ланцюгом атомів. Окрім того, до складу ПАР можуть входити аліфатичні та циклічні радикали та функціональні групи. Існують ПАР, які називають *аліфатичними* (аліфатичний радикал), чи акрил-ароматичними, у яких радикал складається з бензольного кільця і побічного аліфатичного ланцюга, наприклад:

$C_{17}H_{35}-COOH$ – жирна (стеаринова) кислота з аліфатичним радикалом, $C_{18}H_{37}-NH_2$ – жирний амін (октадециламін) з аліфатичним радикалом, $C_{18}H_{37}$ (функціональна група NH_2).

$CH_3CH(CH_2)_{11}CH_3$ – натрієва сіль алкілбензосульфоїкислоти, де $n=11-12$. Радикал складається з бензольного циклу з аліфатичним вуглеводним ланцюгом C_nH_{2n+1} (функціональна група SO).

Сполуки, у яких аліфатичний радикал містить менш як 10 атомів вуглеводню ($C < 10$), звичайно, не мають поверхневої активності, тобто неспроможні адсорбуватися і знижувати поверхневий натяг рідини або поверхневу енергію твердого тіла. Уміщені в радикалі більш як 10 атомів вуглеводню ($C > 10$), сполуки яких є поверхнево-активними, називають *вищими жирними поверхнево-активними речовинами* (вищі жирні кислоти, вищі жирні спирти, вищі жирні аміни тощо).

Довжина вуглеводного радикалу ПАР впливає на поверхневу активність його молекул. Наприклад, поверхнева активність жирних кислот зростає у міру зростання вуглеводного радикалу R у 3,2 рази на кожену групу CH_2 (правило Дюкло-Траубе).

Від структури радикалу і типу функціональної групи залежить розчинність ПАР у різних розчинниках і їх здатність дисоціювати на іони.

Адсорбційний шар ПАР забезпечує тісний зв'язок на поверхні розділу (тверде тіло-рідина). Концентрація шарів утворює в бітумі міцели, у полярних ядрах яких може утримуватись (солюбілізуватись) вода (рис. 10.2). Тут відбувається розчинення речовин, протилежних за природою тому середовищу, у якому виникли міцели. Вуглеводи, нерозчинені у воді, розчиняються у водневих розчинниках ПАР. Ці розпухлі міцели позитивно впливають на структурно-механічні властивості бітуму (підвищується його морозостійкість і водостійкість).

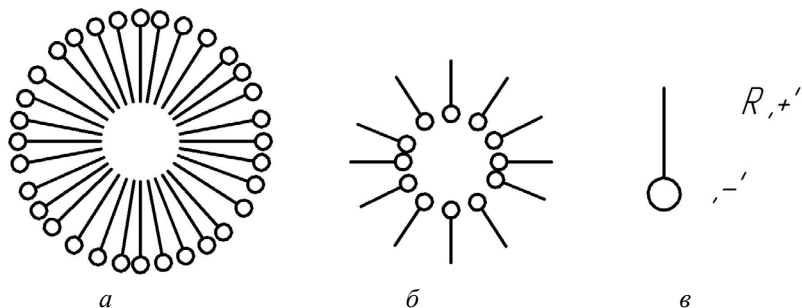


Рис. 10.2. Схеми розташування помірної концентрації ПАР у середовищах рідини різної природи: *a* – полярне середовище; *б* – неполярне середовище; *в* – полярність функціональної групи

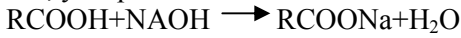
За значної концентрації ПАР мають пластинчасту форму. ПАР мають менший поверхневий натяг, ніж, наприклад, вода. Пояснюють це тим, що взаємодія за участі вільної енергії між молекулою рідини і ПАР менш, ніж між молекулами води. Тому ПАР виштовхується на поверхню розчинника, зменшуючи його поверхню натягу. Міру активності ПАР визначають за мірою активності величиною $\frac{d\sigma}{dC}$ у формулі Гібса:

$$\Gamma = \frac{C}{RT} \cdot \frac{d\sigma}{dC}, \quad (10.1)$$

де C – концентрація розчинного ПАР; σ – поверхневий натяг; R – газова стала; T – абсолютна температура.

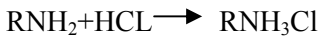
Взагалі, ПАР, у яких функціональні групи мають позитивний заряд, активні у кислому середовищі та неактивні у лужному, тоді як ПАР з негативно зарядженими функціональними групами, активні у лужному та неактивні у кислому середовищах. Активність тісно пов'язана з омиленням (створенням солей) ПАР та іонів.

Наприклад, жирні кислоти у лужному середовищі реагують з лугами, утворюючи мила:



жирна кислота мило вода

Аміни у кислому середовищі омилюються кислотами:



жирний гідрохлорид аміна
амін (сіль)

У воді ці та подібні солі дисоціюють з утворенням відповідних аніонів або катіонів:



Більшість ПАР має дифільну будову молекул, тобто яка складається з 2-х частин – полярної групи та неполярного вуглеводного радикалу.

Полярна група має дипольний момент, здатна до гідратації, що зумовлює спорідненість ПАР з водою (гідрофільність). Гідрофобний вуглеводний радикал є причиною зниження розчинності цих сполук у воді. Таким чином, для того, щоб бути ПАР, молекули розчиненої речовини повинні мати дифільну асиметричну структуру, яка складається з двох частин (гідрофільної і гідрофобної), і відрізняються за молекулярними властивостями та інтенсивністю в них молекулярних сил, що діють у них, і повинні бути просторово відокремлені одна від одної.

У таких молекулах молекулярний баланс, що характеризує співвідношення гідрофільних і гідрофобних властивостей визначає їх поверхневу активність.

Властивості ПАР, механізм дії й особливості практичного застосування залежать від будови їх молекул і взаємодії між ними, з поверхнею мінеральних матеріалів і зовнішнім середовищем.

Для бітумів найбільш придатними адгезійними домішками вважають маслорозчинні або водомаслорозчинні ПАР катіонної природи, віднесені П. О. Ребіндером до групи ПАР-гідрофобізаторів. Велике значення для дорожньої галузі мають ПАР, які відіграють роль пластифікаторів, структуроутворювачів та уповільнювачів старіння бітумів.

10.2. Види поверхнево-активних речовин за їх хімічною будовою

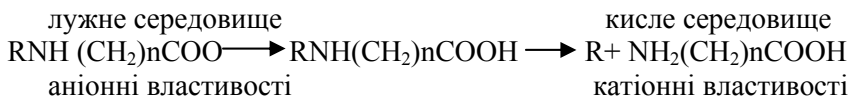
За хімічною будовою ПАР поділяють на три класи – іоногенні, неіоногенні й амфотерні.

Іоногенні ПАР поділяють на два види: аніонактивні ПАР, у яких вуглеводний радикал (довгий ланцюжок) молекули з низькою спорідненістю з дисперсійним середовищем входять до складу аніона, що утворюється у водяному розчині. Наприклад, стеарат натрію, утворює у водяному розчині іони Na^+ і $\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COOH}^-$ (довгий ланцюжок).

Катіонактивні ПАР, у яких вуглеводний радикал (довгий ланцюжок) молекули входить до складу катіону, що утворюється у водяному розчині.

Неіоногенні ПАР – це такі молекули, які містять кінцеві групи, та неіонізовані споріднені з дисперсійним середовищем. До їх складу входять атоми кисню, азоту, сірки тощо. Вони являють собою емульгатори, лінійні речовини. Розчинність неіоногенних ПАР у воді зумовлена функціональними групами, значно спорідненими з нею. До групи неіоногенних ПАР відносять продукти оксиетилювання довголанцюгових спиртових кислот, спиртів, амінів, наприклад, $\text{R}^*\text{COO}(\text{C}_2\text{H}_4\text{O})_n\text{H}$, $\text{R}^*\text{CH}_2\text{O}(\text{C}_2\text{H}_4\text{O})_n\text{H}$, $\text{R}^*\text{C}_6\text{H}_5\text{O}(\text{C}_2\text{H}_4\text{O})\text{OH}$, складні ефіри багатоатомних спиртів і жирних кислот, амідні жирних кислот, лігносульфонові кислоти тощо.

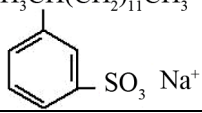


Амфотерні ПАР – це амфотерні (амфіолітні) електроліти, які містять дві функціональні групи, одна з яких кисла за характером, а друга лужна, наприклад, карбоксильна й амінна групи. Такі ПАР залежно від середовища мають аніонні або катіонні властивості



Приклади ПАР різних класів і груп залежно від класифікації, розробленої В. О. Золотарьовим, наведені в табл. 10.1.

Таблиця 10.1

ПАР різних класів і груп

№ п/п	Тип сполук	Характерний представник	Формула
Аніоноактивні ПАР			
1	Мило	Стеарат натрію	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COO}^-\text{Na}^+$
2	Сульфатовані спирти	Лаурилсульфат натрію	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{CH}_2\text{SO}_3^-\text{Na}^+$
3	Ефіри	–	$\text{R}(\text{OCH}_2\text{CH}_2)_n\text{OSO}_3^-\text{Na}^+$
4	Сульфатовані карбонові кислоти	На-солі сульфатованої олеїнової кислоти	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}(\text{CH}_2)_8\text{COO}^-\text{Na}^+\text{OSO}_3^-\text{Na}^+$
5	α -олефінсульфонати	–	$\text{RCH}=\text{CHSO}_2\text{O}^-\text{Na}^+$
6	Нафтові сульфонати	–	Утримують SO_3^- і Na^+
7	Сульфовані ароматичні вуглеводні	Лінійні алкілбензолсульфонати натрію	$\text{CH}_3\text{CH}(\text{CH}_2)_{11}\text{CH}_3$ 
8	Сульфовані ефіри	На-лауриосульфоацитат	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{CH}_2\text{OCOCH}_2\text{SO}_3^-\text{Na}^+$
9	Сульфовані аміди	–	$\text{RCONCH}_2\text{CH}_2\text{SO}_3^-\text{Na}^+$ 
10	Сульфовані оксиетиліровані алкілфеноли	–	$\text{RC}_6\text{H}_4\text{O}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O})_n\text{CH}_2\text{CH}_2\text{SO}_3^-\text{Na}^+$
11	Ациловані амінокислоти	–	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_9\text{CH}_2\text{CON}-\text{CH}_2\text{COOH}$ 

Продовження табл. 10.1

№ п/п	Тип сполук	Характерний представник	Формула
12	Металалкіл-фосфати	Натрійалкілпол-фосфат	$\text{Na}_5\text{R}_5(\text{P}_3\text{O}_{10})_2$
Катіоноактивні ПАР			
13	Четвертинні амонійні солі	Первинні аміни	$\text{R}_2\text{N}^+(\text{CH}_3)_3\text{CL}^-$
		Вторинні аміни	$\text{R}_2\text{N}^+(\text{CH}_3)_2\text{I}_2\text{CL}^-$
		Третинні аміни	$\text{R}_3\text{N}^+(\text{CH}_3)_2\text{CL}^-$
14	Ацетиловані аміни	—	$\text{RCOHN}^+(\text{CH}_3)_3\text{N}(\text{CH}_3)\text{CH}_3\text{O}^-$
15	Солі бензиламонію	—	$\text{CH}_2\text{N}^+(\text{CH}_3)_3\text{RCL}^-$ 
Неіоногенні ПАР			
16	Ефіри багатомних спиртів та вищих кислот	Моногліцерин стеарат	$\text{CH}_2\text{OHCHONCH}_2(\text{CH}_2)_{16}\text{CH}_3$
17	Оксиетиловані аміни	—	$\text{RCH}_2\text{N} \begin{cases} / (\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O})_x\text{H} \\ \backslash (\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O})_y\text{H} \\ x+y=5 \end{cases}$
18	Оксиетиловані вищі жирні кислоти	Поліетиленглікольмоностеарат	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{CH}_2\text{COO}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O})_n\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$
19	Ефіри поліакіленгліколей та алкілфенолів	Поліоксіетиленалкілфенол	$\text{O}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O})_8\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$  $\text{R}=\text{C}_8-\text{C}_{12}$

Закінчення табл. 10.1

№ п/п	Тип сполук	Характерний представник	Формула
20	Продукти конденсації жирних кислот і алканоламінів	Діетаноламін стеарат	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{15} \text{CH}_2\text{CON} \begin{cases} \text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH} \\ \text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH} \end{cases}$
21	Третинні ацетиленові гліколи	4,7-диметил-5-децин-4,7-діол	$\begin{array}{ccc} \text{CH}_3 & & \text{CH}_3 \\ & & \\ \text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CC} & \equiv & \text{CCCCCH}_2\text{CH}_3 \\ & & \\ \text{OH} & & \text{OH} \end{array}$
22	Поліаксетиловані алкілфосфати	–	$\begin{array}{c} \text{C}_8\text{H}_{17}\text{OP(O)} \\ [(\text{OCH}_2\text{CH}_2)_n\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{OH}]_2 \end{array}$
Амфіолітні ПАР			
23	Бетаїни	–	$\begin{array}{c} \text{RCHCOO}^-\text{Na}^+ \\ \\ ^+\text{N}(\text{CH}_3)_3\text{Cl}^- \end{array}$
24	Амінокислоти	–	$\begin{array}{c} \text{RCHCOO}^-\text{Na}^+ \\ \\ ^+\text{NH}_3\text{Cl}^- \end{array}$

10.3. Вплив поверхнево-активних речовин на структуру та властивості бітуму

У 70-ті роки минулого століття українські дослідники М. І. Кучма та колеги проводили роботи, які дали початок використанню поверхнево-активних речовин (ПАР) для покращення властивостей бітумів, а саме міцності та стійкості зчеплення (адгезія) з поверхнею мінерального матеріалу.

Був розроблений метод синтезу катіонактивних ПАР на основі реакції високомолекулярних сполук карбонових кислот з низькомолекулярними адгезійними сполуками, які отримали назву *карбоксил амінів*.

Досліджували фізико-механічні, адгезійні та технологічні властивості бітуму з додаванням карбоксиламінів у широкому діапазоні температур (від $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+160\text{ }^{\circ}\text{C}$). Досліджували бітум марки БНД 90/130 з додаванням 3% від маси бітуму таких видів домішок: карбоксиламін на жировому гудроні гідрохлорований (переведений у сольову форму оброблення концентрованою HCl) і негідрохлорований (вихідний) та карболксиламін на кубових залишках синтетичних жирних кислот (КОСЖК).

Дослідження зчеплення (адгезії) бітуму з карбоксиламінами з поверхнею мінеральних матеріалів показали їх високу адгезійну активність, зумовлену природою карбоксилвмісного компонента та будовою вуглеводного радикалу карбонової кислоти (довжина ланцюжка, наявність полярних і неполярних сполук). Адгезійна активність карбоксиламінів різних типів до мінеральної поверхні щєбінок із гранітних порід наведена в табл. 10.2.

Таблиця 10.2

Адгезійна активність карбоксиламінів

Найменування адгезивів	Оцінка зчеплення (адгезії) за п'ятибальною шкалою	
	вихідний	гідрохлорований
Кубові залишки (КОСЖК) з довжиною ланцюжка:		
$\text{C}_{10}\text{-C}_{16}$	5	5
$\text{C}_{17}\text{-C}_{20}$	4	5
$\text{C}_{18}\text{-C}_{23}$	3	4
Олеїнова кислота	3	4
Жировий гудрон	5	5
Талова олія	2	3
Смола газогенераторна	2	2

Вплив катіонактивних ПАР – карбоксиламінів на в'язкість бітуму залежно від температури наведений на рис. 10.3.

Дослідження проводили в інтервалі температур від $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Як видно, домішки знижують в'язкість в'язучої речовини, тобто пластифікують бітум. В інтервалі температур від $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ відбувається початок руйнування структури бітуму (зміна в'язкості). За температури, вищої за $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, структура бітуму руйнується остаточно, і він переходить із в'язкопружного стану у

стан, який характеризується властивостями ньютонівської рідини. Для оцінки міри впливу ПАР на в'язкість бітуму прийнятий умовний коефіцієнт ($K_{ум}$) відношення в'язкості вихідного бітуму η_0 до в'язкості бітуму з домішкою ПАР $\eta_{доб}$ (табл. 10.3).

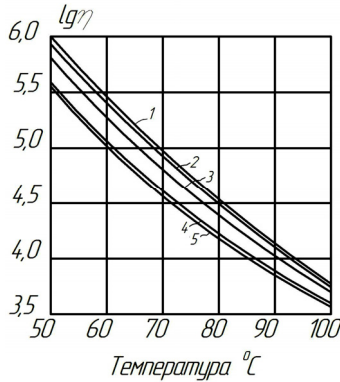


Рис. 10.3. Температурна залежність в'язкості бітумів з додаванням катіоноактивних речовин: 1 – бітум без карбоксил аміну (вихідний); 2 – з карбоксиламіном (гідрохлорований) на жировому гудроні; 3 – з карбоксил аміном (негідрохлорований) на жировому гудроні; 4 – з карбоксиламіном на КО СЖК; 5 – з діаміном

Таблиця 10.3

Значення коефіцієнта ($K_{ум}$) за різних температур

Домішка	$K_{ум} = \frac{\eta_0}{\eta_{доб}}$ за температури випробувань, град		
	50	100	160
Карбоксиламін на жировому гудроні, гідро хлорований	1,31	1,25	1,20
Карбоксиламін на жировому гудроні, негідрохлорований	2,66	1,37	1,29
Карбоксиламін на КОСЯК	1,54	1,30	1,20

У зв'язку з тим, що всі домішки пластифікують бітум (але кращі значення має карбоксиламін на КОСЖК), температури приготування, укладання й ущільнення асфальтового бетону мо-

жуть бути знижені на 10–20 °С без погіршення фізико-механічних властивостей. Структурний вплив на бітум катіонактивних ПАР (на прикладі карбоксиламіну) виявляється в тому, що протягом дослідження в'язкості системи бітум–ПАР спостерігається уповільнення процесу переходу бітуму зі структурованого в рідкий стан у міру підвищення температури (рис. 10.4)

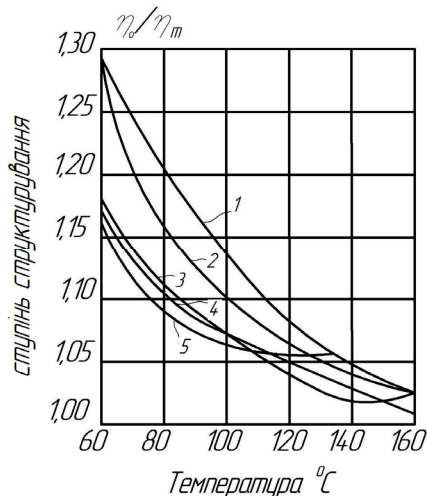


Рис. 10.4. Вплив домішок катіонактивних речовин на структуру бітумів
 1 – бітум без карбоксиламіну (вихідний); 2 – з карбоксиламіном на жировому гудроні гідрохлорований; 3 – з карбоксиламіном на жировому гудроні; 4 – з карбоксиламіном на КО СЖК; 5 – з діаміном

Найбільший структуровальний вплив (за 60 °С) мають карбоксиламіни на жировому гудроні гідрохлорований і на КОСЖК.

10.4. Реологічні властивості бітуму з додаванням поверхнево-активних речовин

Уведення катіонактивних ПАР покращують реологічні властивості бітуму, тобто його текучість (залежність швидкості зсуву бітуму від величини зсувної напруги, за температури, наближеної до температури розм'якшеності бітуму).

Відомо, що якщо текучість бітуму η за температури, наближеної до температури розм'якшеності, дорівнює одиниці та

зменшується незначно у міру зниження температури, то поведінка бітуму наближається до ньютонівської рідини. Такий бітум нееластичний і крихкий за низьких температур. Якщо текучість за температури розм'якшеності менша за одиницю і у міру зниження температури відбувається її інтенсивне зменшення, то бітум більш пластичний за низьких температур і дає більш гнучку плівку. Тобто ступенем текучості можна характеризувати структуру бітуму.

Результати визначення ступеню текучості бітуму з додаванням карбоксиламіну наведені в табл. 10.4.

Таблиця 10.4

Ступінь текучості бітуму з карбоксиламіном

Назва матеріалів	Температура розм'якшеності, °С	Ступінь текучості бітуму за температури, °С		
		50	45	40
Вихідний бітум	48,2	1,02	1,0	0,91
Бітум з додаванням карбоксиламінів на:				
– жировому гудроні, гідрохлорований	43,9	-	0,87	0,82
– на жировому гудроні, негідрохлорований	42,4	-	0,95	0,90
На КОСЖК	45,2	-	0,98	0,94

У результаті можна зробити висновок, що всі домішки катіонактивних ПАР знижують ступінь текучості бітуму, тобто підвищують його еластичність, а отже, – технологічні й експлуатаційні властивості бітуму й асфальтобетону.

10.5. Взаємодія бітумів і мінеральних матеріалів у присутності ПАР у композиційних матеріалах

Відомо, що ПАР буває аніонного та катіонного типів.

Адсорбція аніонактивних ПАР на поверхнях різних мінеральних матеріалів визначається властивостями полярної функціональної групи, її здатністю утворювати мила з металами. Активність залежить від довжини, ненасиченості вуглеводного радикалу та збільшення кількості подвійних зв'язків (рис. 10.5).

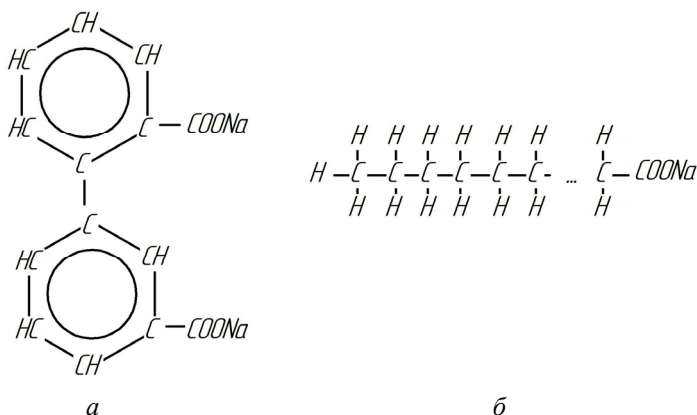


Рис. 10.5. Структура активних ПАА: *a* – з подвійним зв’язком; *б* – з одинарним зв’язком

Краща взаємодія бітуму з мінеральними матеріалами виявляється впродовж використання катіоактивних ПАА, які хімічно взаємодіють з матеріалом, утворюючи нерозчинні у воді хемосорбційні сполуки.

Відповідно до адсорбційно-молекулярної теорії адгезії початковою стадією формування адгезійного контакту є наближення молекул бітуму до поверхні, з наступною дією молекулярних сил – початок змочування бітумом поверхні мінерального заповнювача. ПАА покращують змочування. Навіть на мокрій поверхні утворюються бітумні плівки. Без уведення ПАА бітум збирається в краплі. Після змочування відбувається вибіркова адсорбція і хемосорбція активних компонентів бітуму. На адсорбційні процеси впливають: пористість; активність адсорбційних центрів (мінералогічний склад заповнювача).

Ребра, кути, піки заповнювача найбільш придатні для хемосорбційних процесів з бітумами, а ями, щілини, поглиблення – для фізичного прилипання в’язучої речовини. Активне переміщення молекул бітуму сприяє кращому прилипанню до поверхні.

ПАА можуть використовуватись як речовини, що змінюють властивості бітуму. Вони впливають на взаємодію асфальтенів між собою і на смолувуглецеві компоненти, бітуми, деструктуючи структурні сітки бітумів.

Катіонні ПАР більш активні ніж аніонні, вони зменшують в'язкість, температуру розм'якшення бітуму, збільшуються розтяжність і еластичність за від'ємної температури.

Катіони класу залізних і кальцієвих солей (мил) високомолекулярних кислот добре адсорбуються асфальтенами бітуму. Радикали цих ПАР занурюються в структурну сітку смол і зменшують кількість структуроутворювальних елементів бітуму – асфальтенів в одиниці об'єму.

Залістисті солі прискорюють окислення вуглеводнів і смол бітуму в асфальтени та інші високомолекулярні компоненти, що можна використовувати для отримання з рідких і малов'язких бітумів без використання технологічних прийомів нафтопереробки.

Катіонактивні ПАР впливають на міцність бітумної плівки у водних умовах, збільшують її щільність і морозостійкість. Додавання ПАР у бітум покращує удобоукладальність і рухомість асфальтобетонних сумішей за рахунок збільшення полярності в'язучої речовини, зменшує самозлипання часток (аутогезія). Застосування маломіцних мінеральних матеріалів і заповнювача для покращення ущільнення, передбачає використання віброкотків (вібраційний ефект), що дозволяє поліпшити технологічні й експлуатаційні властивості асфальтобетону та збільшення продуктивності робіт. Катіонактивні ПАР у дорожньому й аеродромному будівництвах використовують значно частіше ніж аніонактивні.

Питання для самоконтролю



1. Що таке поверхнево-активні речовини (ПАР)?
2. Назвіть три види поверхнево-активних речовин.
3. Як відбувається взаємодія бітумів і мінеральних матеріалів у присутності ПАР у композиційних матеріалах?

Розділ 11. КЛАСИФІКАЦІЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ОРГАНІЧНИХ В'ЯЖУЧИХ РЕЧОВИН

До композиційних матеріалів на основі органічних в'язучих речовин відносять асфальтовий бетон (асфальтобетон) і дьогтевий бетон (дьогтебетон), емульсійно-мінеральні суміші і вологі органо-мінеральні суміші – ВОМС.

11.1. Асфальтовий бетон. Види та властивості

Асфальтобетонні суміші та асфальтобетон згідно з вимогами ДСТУ Б В.2.7-119:2003 поділяють на гарячий на в'язучих і холодний – на рідких бітумах.

Гарячі асфальтобетони (асфальтобетонні суміші) містять в'язучий бітум марок БНД 90/130, БНД 60/90, БНД 40/60, які укладають за температури 140–160°C, формування структури закінчується після ущільнення котками.

Холодні асфальтобетони (асфальтобетонні суміші) готують на рідких бітумах марок ПГ 70/13 (повільно густіючі) і СГ 70/130 (середньо густіючі), які укладають за температури не нижчій за +5°C.

За крупністю скелетних фракцій асфальтобетони поділяють на крупнозернисті, що містять фракції щебеню від 20 до 40 мм, дрібнозернисті – 10–20 мм і піщані – 0–5 мм, що містять природний або штучний пісок.

Крупнозернистими можуть бути тільки гарячі асфальтобетони.

За пористістю (щільністю) – залишковою пористістю асфальтобетони поділяють на щільні – 3–5 % пор за об'ємом, пористі – 5–10 % пор за об'ємом і високопористі – 12–18 % пор за об'ємом.

Залежно від властивостей мінеральних матеріалів (міцність щебеню, якість мінерального порошку) і фізико-механічних властивостей асфальтобетони поділяють на марки.

Властивості асфальтобетону залежно від марок наведені в табл. 11.1.

Таблиця 11.1

**Вимоги до фізико-механічних властивостей асфальтобетонів
для районів А-4, А-5, А-3 (Полтавська обл., східна частина
Черкаської та північна частина Харківської обл.),
А-6 (східна частина Дніпропетровської обл.)**

Найменування показників	Норми для асфальтобетонів марок	
	I	II
1. Пористість мінерального кістяка, % за об'ємом, для асфальтобетонів із сумішей типів: А і Б В і Г Д	15–19 18–22 18–22	15–19 18–22 18–22
2. Залишкова пористість, % за об'ємом	2–5	2–5
3. Водонасичення, % за об'ємом, для асфальтобетонів із сумішей типу: А Б і Г В і Д	1,5–4,0 1,5–3,5 1,5–3,0	1,5–4,0 1,5–3,5 1,5–3,0
4. Набрякання, % за об'ємом, для асфальтобетонів із сумішей усіх типів, не більше	0,5	1,0
5. Межа міцності на стиск, МПа, за температури: 0°С для асфальтобетонів із сумішей усіх типів, не вища як 20°0 для асфальтобетонів із сумішей усіх типів, не нижча як 50°С для асфальтобетонів із сумішей типів: А, не нижча Б і В, не нижча Г, не нижча Д, не нижча	12,0/10,0 2,5/2,2 1,1/1,0 1,2/1,0 1,4/1,3	13,0/11,0 2,3/1,9 1,0/0,9 1,1/1,0 1,2/1,1 1,2/1,1
6. Коефіцієнт водостійкості, не менший	0,90/0,85	0,85/0,80
7. Коефіцієнт тривалої водостійкості, не менший	0,85/0,80	0,75/0,70

Примітка. Значення показників у чисельнику належить до асфальтобетонів, виготовлених на бітумах з глибиною занурення голки від 40 до 90 (0,1) мм, у знаменнику – від 90 до 200 (0,1) мм.

Таблиця 11.2

Вимоги до фізико-механічних властивостей асфальтобетонів для районів А–1, А–2 (за винятком Гірських Карпат), А–3 (Чернігівська, Сумська обл. і північно-східна частина Київської обл.), А–6 (південна частина Харківської і північна частина Запорізької обл.)

Найменування показників	Норми для асфальтобетонів марок	
	I	II
1. Пористість мінерального кістяка, % за об'ємом, для асфальтобетонів із сумішею типів:		
А і Б	15–18	15–18
В	17–20	17–20
Г	17–20	17–20
Д		17–20
2. Залишкова пористість, % за об'ємом	2–4	2–4
3. Водонасичення, % за об'ємом, для асфальтобетонів із сумішею типу:		
А	1,5–3,0	1,5–3,5
Б і Г	1,0–2,5	1,0–3,0
В і Д	1,0–2,0	1,0–2,5
4. Набрякання, % за об'ємом, для асфальтобетонів із сумішею усіх типів, не більше як	0,50	0,85
5. Межа міцності на стиск, МПа, за температури:		
0°С для асфальтобетонів із сумішею усіх типів, не вища	12,0/10,0	13,0/11,0
20°С для асфальтобетонів із сумішею усіх типів, не нижча	2,5/2,2	2,3/1,9
50°С для асфальтобетонів із сумішею типів:		
А, не нижча	1,1/1,0	1,0/0,9
Б і В, не нижча	1,2/1,0	1,1/1,0
Г, не нижча	1,4/1,3	1,2/1,1
Д, не нижча		1,2/1,1
6. Коефіцієнт водостійкості, не менший	0,90/0,85	0,85/0,80
7. Коефіцієнт тривалої водостійкості, не менший	0,85/0,80	0,80/0,75

Примітка. Значення показників у чисельнику належить до асфальтобетонів, виготовлених на бітумах з глибиною занурення голки від 40 до 90 (0,1) мм, у знаменнику – від 90 до 200 (0,1) мм.

Таблиця 11.3

**Вимоги до фізико-механічних властивостей асфальтобетонів
для району А-7 (Херсонська, південна частина Запорізької обл.)**

Найменування показників	Норми для асфальтобетонів марок	
	I	II
1. Пористість мінерального кістяка, % за об'ємом, для асфальтобетонів із сумішей типів: А і Б В і Г Д	15–19 18–22 18–22	15–19 18–22 18–22
2. Залишкова пористість, % за об'ємом	2–5	2–5
3. Водонасичення, % за об'ємом, для асфальтобетонів із сумішей типу: А Б і Г В і Д	1,5–4,5 1,5–3,5 1,5–3,0	1,5–4,5 1,5–3,5 1,5–3,0
4. Набрякання, % за об'ємом, для асфальтобетонів із сумішей усіх типів, не більше	0,5	1,0
5. Межа міцності на стиск, МПа, за температури: 0°С для асфальтобетонів із сумішей усіх типів, не вища 20°С для асфальтобетонів із сумішей усіх типів, не нижча 50°С для асфальтобетонів із сумішей типів: А, не нижча Б і В, не нижча Г, не нижча Д, не нижча	12,0/10,0 2,6/2,4 1,2/– 1,3/1,2 1,6/1,3 –	13,0/11,0 2,4/2,2 1,2/– 1,2/1,1 1,5/1,2 1,3/1,1
6. Коефіцієнт водостійкості, не менший	0,90/0,85	0,85/0,80
7. Коефіцієнт довготривалої водостійкості, не менший	0,85/0,80	0,75/0,70

Примітка. Значення показників у чисельнику належать до асфальтобетонів, виготовлених на бітумах з глибиною занурення голки від 40 до 90 (0,1) мм, у знаменнику – від 90 до 200 (0,1) мм.

Таблиця 11.4

**Вимоги до фізико-механічних властивостей асфальтобетонів
для районів А–2 (Гірські Карпати) і А–6 (Дніпропетровська,
Донецька, Луганська обл.)**

Найменування показників	Норми для асфальтобетонів марок	
	I	II
1. Пористість мінерального кістяка, % за об'ємом, для асфальтобетонів із сумішей типів: А і Б В Г Д	15–18 17–20 17–20 –	15–18 17–20 17–20 17–20
2. Залишкова пористість, % за об'ємом	2–4	2–4
3. Водонасичення, % за об'ємом, для асфальтобетонів із сумішей типу: А Б і Г В і Д	1,5–3,0 1,0–2,5 1,0–2,0	1,5–3,5 1,0–3,0 1,0–2,5
4. Набрякання, % за об'ємом, для асфальтобетонів із сумішей всіх типів, не більше	0,50	0,85
5. Межа міцності на стиск, МПа, за температури: 0°С для асфальтобетонів із сумішей усіх типів, не вища 20°С для асфальтобетонів із сумішей усіх типів, не нижча 50°С для асфальтобетонів із сумішей типів. А, не нижча Б і В, не нижча Г, не нижча Д, не нижча	11,0/9,0 2,6/2,4 1,2/1,1 1,3/1,2 1,6/1,3 –	12,0/10,0 2,4/2,2 1,2/1,1 1,2/1,1 1,5/1,2 1,3/1,1
6. Коефіцієнт водостійкості, не менший	0,90/0,85	0,85/0,80
7. Коефіцієнт тривалої водостійкості, не менший	0,85/0,80	0,80/0,75
Примітка. Значення показників у чисельнику належить до асфальтобетонів, виготовлених на бітумах з глибиною занурення голки від 40 до 90 (0,1) мм, у знаменнику – від 90 до 200 (0,1) мм.		

Найширшого використання в дорожньому і аеродромному будівництвах набув гарячий асфальтобетон.

Покриття з цього матеріалу стійкі до дії транспортних навантажень і атмосферних факторів. Їх укладають на дорогах будь-якої вантажнапруженості. Найважливіша особливість покриттів з гарячого асфальтобетону – короткий термін їх формування, який закінчується із завершенням процесу ущільнення застиганням матеріалу до температури навколишнього середовища. Рух автомобілів по такому покриттю може бути відкритий уже за кілька годин після укладання асфальтобетонної суміші. Ця обставина важлива для всіх об'єктів дорожнього й аеродромного будівництва, але особливо значення набуває для ведення робіт в умовах міста, в аеропортах вищих категорій, для реконструкції доріг і ремонтних робіт, тобто таких, які виконують без тривалих перерв руху транспортних засобів (повітряних і наземних).

Гарячий асфальтобетон застосовують для верхніх і нижніх, шарів покриттів, вирівнювання шарів, а також для укладання шарів основи (у цьому разі можливе зниження вимог до якості мінеральних матеріалів, що використовують).

Асфальтобетонні суміші, які укладають у холодному стані, завдяки застосуванню в них рідких бітумів і суттєвому зниженню кількості в'язучого матеріалу, порівняно з гарячими асфальтобетонними сумішами, здатні тривалий час залишатися пухкими. Ця особливість холодного асфальтобетону дає можливість заготовлювати його наперед (він може зберігатися до 6 місяців), що, своєю чергою, означає можливість цілорічної роботи асфальтобетонних заводів, рівномірне використання транспортних засобів, а також можливість улаштовувати асфальтобетонні покриття на далеких відстанях від асфальтобетонних заводів. Важливою особливістю холодного асфальтобетону, яка відрізняє його від гарячого, є можливість його застосування в тонкошарових покриттях (товщиною 1 і 1,5 см), а також для поверхневих оброблень дорожніх покриттів. Особливо зручний цей матеріал для ремонту (ямкового) асфальтобетонних покриттів. Холодний асфальтобетон застосовують, для укладання верхнього шару покриття.

Недоліком холодного асфальтобетону є тривалий період формування в покритті (1,5–3 місяці залежно від характеристик бітуму, інтенсивності руху автомобілів, погодних умов). Внаслідок недостатньої щільності та слабких структурних зв'язків холодний

асфальтобетон характеризується низькою водо- та морозостійкістю, тому його застосовують на дорогах нижчих категорій.

Покращення експлуатаційних властивостей холодного асфальтобетону можливе за рахунок використання активованих мінеральних матеріалів, а саме активованих мінеральних порошків (помітно скорочуються терміни формування покриттів, зростають водо- та морозостійкість), а також введенням полімерних та волоконних домішок. Якщо традиційний холодний асфальтобетон остаточно ущільнюється під впливом автомобілів, що рухаються (котки надають йому лише початкового ущільнення), то асфальтобетон, який містить активований мінеральний порошок і полімерні та волоконні домішки, ущільнюють котками (як гарячий асфальтобетон) до високої щільності, що забезпечує прискорення формування міцної, водо-, морозо- та корозійностійкої структури асфальтобетону. Нові технологічні прийоми дозволяють таким чином розширити застосування холодного асфальтобетону.

Асфальтобетони за щільністю обирають з урахуванням умов їх роботи. Пористий асфальтобетон (крупно- чи середньозернистий), виготовлений з незначною кількістю мінерального порошку або без нього, головним чином призначений тільки для укладання нижнього або вирівнювального шару покриття, чи для шарів основи. Верхні шари покриття укладають тільки із щільних асфальтобетонів. Їх щільності досягають, добираючи мінеральну частину з максимальною щільністю (що передбачає вміст визначеної кількості мінерального порошку), введенням оптимальної кількості бітуму з полімерними домішками та ретельним ущільненням асфальтобетонної суміші.

Зрослі інтенсивність і вантажонапруженість руху ставлять високі вимоги до нижніх шарів асфальтобетонних покриттів, у зв'язку з чим у багатьох випадках доцільно для укладання цих шарів застосовувати щільні асфальтобетони. Якщо нижній шар покриття залишається на зимовий період без верхнього шару, його у всіх випадках рекомендують укладати (для кращого збереження) і подальшої роботи зі щільного асфальтобетону.

Практично, крупнозернисті асфальтобетони застосовують для укладання нижніх шарів покриттів, шорстка поверхня яких сприяє кращому зчепленню з верхнім шаром, а також для укладання основ.

Асфальтобетони, які містять щебінь з найбільшою крупністю часток 25 мм, застосовують, головним чином, для улаштування верхніх шарів покриттів, а також для одношарових покриттів. Цей

вид асфальтобетону надає поверхні покриття грубої шорсткості, яка необхідна для забезпечення належного зчеплення з автомобільними шинами, особливо в найбільш небезпечних місцях (ухили, повороти тощо).

Для укладання верхніх шарів покриттів використовують також дрібнозернисті асфальтобетони, які містять щебінь з найбільшою крупністю зерен 10–15 мм, оскільки ці асфальтобетони однорідніші і більш корозійно стійкі. За оптимального гранулометричного складу та дотримання інших вимог, покриття із дрібнозернистих асфальтобетонів характеризують міцність і достатня зсувостійкість, що запобігає утворенню напливів, хвиль і колій.

Піщаний асфальтобетон за ретельного добирання складу та правильної технології приготування також забезпечує високу якість дорожніх покриттів.

Щодо корозійної стійкості (до дії вологи та знакоперемінних температур) піщаний асфальтобетон не тільки не поступається дрібнозерному, а часто має більше переваг. Вартість піщаного асфальтобетону, зазвичай, нижча ніж інших видів щільного асфальтобетону, тому його широко застосовують для укладання верхнього шару покриття міських і магістральних доріг нижчих категорій.

Цей вид асфальтобетону часто застосовують і в закордонній дорожньо-будівельній практиці.

Але піщаний асфальтобетон пластичніший ніж щебеністі асфальтобетони, тому на таких покриттях можна частіше помітити хвилі та зсуви. Ця особливість піщаного асфальтобетону вимагає більш ретельного підбирання його складу. Особливо важливо дотримуватися принципу підбирання «щільної мінеральної суміші», що дозволяє обмежитися мінімальною кількістю бітуму.

11.2. Асфальтополімербетон

Асфальтополімербетон – це матеріал, який, окрім складових, що є в традиційному асфальтобетоні, містить нафтовий бітум модифікований полімерними домішками.

Дослідження визначення порошкоподібних відходів перероблення старих кабелів – суміші Пв та каучуків для модифікації асфальтобетонів показали, що асфальтобетон на основі бітуму, модифікованого 5 та 7 % відходів, мав у 2 рази більшу міцність на стиск за 50 °С, ніж звичайний без зниження опору низькотемпературному розтріскуванню. Додаванням відходів суміші Пв та

каучуків у кількості 1 % від маси мінеральної частини безносе-редньо в змішувач для виготовлення асфальтобетонної суміші, отримують збільшення міцності на стиск за 50 °С в 1,7 рази.

Таким чином, є можливість скорочення вартості модифікованих бітумів в Україні шляхом використання Пв.

Еластичність, якої набуває в'язуча речовина після введення полімеру в бітум, є однією з ознак ефективності полімеру, і фактично свідчить про наявність або відсутність структурної сітки в полімербітумній в'язучій речовині, про нову конформацію її структурних елементів, що забезпечують когезійну міцність та міцність за втоми.

Фізико-механічні властивості гарячого дрібнозернистого асфальтополімербетону з мінеральними порошками різної природи та БМП наведені в табл. 11.5.

Таблиця 11.5

Фізико-механічні властивості асфальтополімербетонних сумішей, виготовлених з використанням мінеральних порошоків різної природи та полімер-бітумної в'язучої речовини БМП 60/90

Назва показника	Гранітний відсів 100 % БМП – 6,5 %	Гранітний відсів 95 %, Скала-Подільський мінеральний порошок – 5 %; БМП 6,5 %	Гранітний відсів 95 %; мелений домений шлак – 5 %; БМП-6,5 %	Гранітний відсів 95%; мелені сланці Криворізького ЦГКЗ-5 %; БМП – 6,5	Гранітний відсів 95 %; мелені Овруцькі кварцити – 5%; БМП – 6,5 %.	Вимоги ДСТУ БВ.2.7–119–2003
Середня щільність, г/см ³	2,31	2,33	2,35	2,34	2,34	-
Водонасичення, % за об'ємом	2,5	1,6	1,9	2,0	2,4	1,0-2,5
Набрякання, % за об'ємом	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	<0,5
Межа міцності на стиск, МПа за температури						
0 °С	9,6	11,0	10,4	10,8	9,9	<11
20 °С	4,6	5,6	5,4	5,6	4,3	>2,5
50 °С	2,4	2,7	2,5	2,8	2,2	>1,6
Коефіцієнт водостійкості	0,94	0,98	0,96	0,97	0,93	>0,9

Полімери підвищують теплостійкість бітумів, забезпечують стабільність структури у разі тривалого зберігання за робочих температур.

Бітуми з додаванням полімерів повинні відповідати вимогам чинних технічних умов ТУ У В.2.7–24.1–03450778–198 «Бітуми, модифіковані полімерами».

Асфальтополімербетонні дорожні покриття значно краще витримують зміни складу та зростання інтенсивності руху автотранспортного потоку.

Питання для самоконтролю



1. Які види асфальтобетонних сумішей ви знаєте?
2. Назвіть властивості асфальтобетонних сумішей.
3. Схарактеризуйте асфальтополімербетон.

Розділ 12. РЕОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ АСФАЛЬТОВОГО БЕТОНУ

Реологія – це наука про деформації та текучість матеріалів, що досліджує розвиток деформаційних процесів у матеріалах, які відбуваються з часом під дією навантажень.

Асфальтовий бетон є матеріалом, деформування якого залежить від часу дії навантаження і швидкості його прикладання. Величина напруг, що виникають, зумовлюється швидкістю процесу деформування і величиною деформації. Тобто асфальтобетон є реологічним матеріалом, у якого за експлуатації як у літній, так і в зимовий періоди виникають деформації з малою швидкістю зростання за рахунок нагрівання або охолодження покриття.

До основних реологічних властивостей асфальтобетону відносять: пружність, пластичність, міцність.

Пружність являє собою властивість, внаслідок дії якої деформація тіла зникає після зняття напруги. Пружну деформацію, яка зникає цілком після зняття зовнішніх сил називають *зворотньою*.

Класичне пружне тіло підкоряється закону Гука, який для осьового розтягнення (σ) має вигляд:

$$\sigma = \varepsilon E, \quad (12.1)$$

а для зсуву (τ)

$$\tau = \gamma G. \quad (12.2)$$

Модуль пружності E характеризує жорсткість матеріалу, тобто його властивість деформуватись під дією зовнішніх сил. Чим вища енергія міжатомних зв'язків у матеріалі, тим менше він підлягає деформаціям і тим вищий його модуль пружності.

В'язкість – це властивість асфальтобетону (бітуму) чинити опір за переміщення складових компонентів у процесі перемішування. В'язкість характеризує коефіцієнт в'язкості η .

Закон в'язучої течії, отриманий Ньютоном, має вигляд:

$$\tau = \eta \frac{dy}{dt} \quad (12.3)$$

Механічна модель, що відповідає закону Ньютона являє собою циліндр, наповнений олією, у якому може пересуватись нещільно прикладений поршень

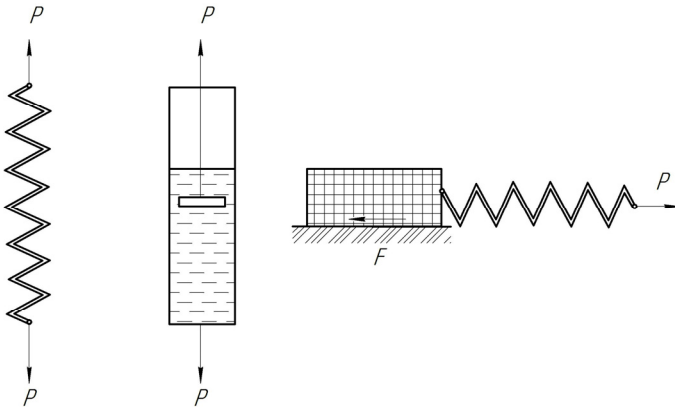


Рис. 12.1. Механічна модель

Пластичність – це властивість матеріалу змінювати форму та розміри без руйнування у разі дії навантаження або внутрішніх напруг, зберігаючи цю форму та розміри після припинення дії напруги. Межа пластичності визначає межу напруги, до появи якої матеріал поводить інакше ніж після неї.

Міцність – це властивість матеріалу чинити опір руйнуванню від дії внутрішніх напруг, що виникають унаслідок впливу зовнішніх навантажень. У процесі експлуатації на асфальтобетонні покриття впливають напруги стискання, згинання і розтягнення.

Окрім того, є складні реологічні властивості асфальтобетону, до яких можна віднести еластичність і релаксацію напруг.

Еластичність – це властивість асфальтобетону, яка полягає в тому, що пружна деформація від дії зовнішніх сил виявляється не одразу після прикладання навантаження, а за досягнення своєї кінцевої величини, тобто вичерпанні запасу опору до дії зовнішніх сил. Але дослідженнями визначено, що в асфальтобетоні значна частина максимальної деформації відбувається за період часу $t=3t_{\text{зап}}$ (де $t_{\text{зап}}$ – час запізнення дії деформації). Якщо в момент $t=t_{\text{зап}}$, зняти напругу, то еластична деформація повільно зменшується.

Релаксація напруг – це процес самоповільного розподілення напруг під час деформації, величина якої залишається постійною протягом часу. Час релаксації – це період, упродовж якого напруга зменшується.

Таким чином, деформування асфальтобетону – це складний процес, який складається з пружних, в'язучих та еластичних деформацій.

Пружна деформація виникає одразу після прикладання навантаження. Після цього поступово розвивається в'язуча (яка залежить від властивостей бітуму) і еластична деформації. За певний час еластична деформація практично перестав збільшуватись, і процес деформування асфальтобетону відбувається за рахунок розвитку деформації в'язкої течії.

Шляхом наповнення бітуму високоактивними тонкодисперсними наповнювачами (мінеральні порошки активної дії) і структурувальними домішками можна збільшити міцність і в'язкість асфальтобетону. Але дослідження М. В. Михайлова виявили, що у всіх випадках структура асфальтобетону буде залишатись коагуляційною і тільки з використанням полімербітумів можна отримати асфальтобетон з коагуляційно-конденсаційною структурою.

12.1. Дьогтебетон. Структура та властивості

Дьогтебетон – це композиційний матеріал, отриманий ущільненням суміші дьогтю, щебеню, піску та мінерального порошку, узятих у відповідних співвідношеннях.

За крупністю зерен мінеральних матеріалів його поділяють на крупнозернистий (розмір зерен до 40 мм), дрібнозернистий (до 20 мм) і піщаний (0–5 мм). Кількість кам'яновугільного дьогтю знаходиться в межах від 6 до 12 % від маси мінерального матеріалу (більш як 100 %).

Кількість щебеню визначає його фізико-механічні властивості та характер макроструктури. Тому за вмістом щебеню в дьогтебетоні 35–50 % його називають *багатощебеновим*, а за вмісту щебеню 20–35 % – *малощебеновим*. Збільшення в дьогтебетоні кількості щебеню сприяє збільшенню його щільності, водо- та корозійної стійкості.

За щільністю дьогтебетони бувають двох видів: щільні та пористі.

Залежно від удобоукладальності дьогтебетони бувають жорсткими та пластичними.

За температурою укладання і в'язкістю дьогті поділяють на гарячі та холодні.

Для отримання гарячих сумішей використовують окислений дьоготь і дьоготь, модифікований домішками полімерів (полівінілхлориду, поліетилену, полістиролу), марок Д-7 (в'язкість C_{50}^{10} – 10–75 С) і Д-8 (C_{50}^{10} – 75–200 С). Для холодних – Д-5 і Д-6 (C_{30}^{10} – 50–200 с).

Для приготування гарячого дьогтебетону використовують дьоготь марок Д-5, Д-6, а для холодного – Д-3, Д-4.

Дьогтебетонну суміш виготовляють на асфальтобетонних заводах (АБЗ) аналогічно до асфальтобетонної суміші. Час, необхідний для перемішування суміші з в'язучою речовиною дещо менший ніж для приготування асфальтобетонної суміші (на 2–4 хв). Це пояснюють тим, що дьоготь має знижену в'язкість і більш активно взаємодіє з кам'яним матеріалом, у результаті чого швидше відбувається обволікування зерен матеріалу. Унаслідок цього полегшується ущільнення дьогтебетонних сумішей у процесі укладання покриттів.

Дьогтебетонні покриття менш довговічні ніж асфальтобетонні, оскільки дьогтебетон має меншу водо-зносо- і теплостійкість. Дьогтебетони старіють інтенсивніше ніж асфальтобетони. Як визначає В. О. Золотарьов, незворотні зміни складу, структури, й отже, властивостей дьогтебетону відбуваються внаслідок зниження розчинювальної здатності дисперсійного середовища дьогтів у результаті випару легких фракцій, а також вимиванням водорозчинних сполук і смолоутворенням під впливом кисню повітря і води. Це призводить до зростання в'язкості дисперсійного середовища, асоціації і агрегації компонентів кристалізації вуглеводнів (нафталін, антрацен, хризен та інші) у напрямку утворення і розвитку тривимірного структурного каркасу з частинок дисперсної фази. Зростання в'язкості дисперсійного середовища і розвиток структури сповільнюють релаксаційні процеси в плівках дьогтів, знижують їх пластичність за низьких температур і ведуть до утворення мікрodefektів у дьогтебетоні через зменшення обсягу в'язучої речовини. Тріщиностійкість і стійкість до впливу води та агресивних середовищ зменшується.

Під дією високих літніх температур дьогтебетонні покриття більшою мірою розм'якшуються, і тоді часто можна спостерігати пластичні деформації. Тому для приготування дьогтебетонних сумішей слід використовувати кам'яні матеріали із зернами кутуватої форми та шорсткою поверхнею, а якщо можливо природний пісок замінити штучним. Окрім того, дьогтебетон слід використовувати для укладання нижніх шарів покриття, де температура нагрівання матеріалу від сонячних променів на 6–8 °С нижча, ніж у верхньому шарі. Теплостійкість дьогтебетону значно збільшується за використання для його приготування наповненого дьогтю, або введенні до складу полімерних чи сірковмісних домішок.

Загалом, внаслідок низьких експлуатаційних властивостей і зменшення кількості сировини для його приготування використання дьогтебетону щороку зменшується.

12.2. Дьогтеполімербетон, його складові та властивості

Дьогтеполімербетон – це матеріал, який, окрім основних складових, містить дьоготь, модифікований полімерами.

Дьогтеполімерні в'язучі речовини, як і звичайні дьогтеві в'язкі речовини, можна розглядати як різновид термопластичного матеріалу, властивості якого залежать від температури. Отже, і властивості дьогтеполімербетону будуть залежити від видів і співвідношення складових компонентів та від технологічного режиму приготування і застосування.

Для приготування дьогтеполімербетонів краще за все використовувати дьогтеполімерні в'язучі речовини, виготовлені шляхом суміщення дьогтю з відходами виробництва фенілетилену та його полімерів у вигляді полістирольного пилу (ППС) та кубових залишків ректифікації стиролу (КЗРС).

Дьогтеполімербетонні суміші готують і ущільнюють за температури близько 100 °С. Формування циліндричних зразків з діаметром і висотою, рівними 71,4 мм виконують на гідравлічному пресі під різним навантаженням (5, 10, 20, 30, 40 МПа протягом 180 с.).

З усіх технологічних факторів найбільший вплив на властивості дьогтеполімербетону має температура його приготування й ущільнення та режим ущільнення.

Залежність фізико-механічних властивостей дьогтеполімербетону від ущільнювального навантаження за температур 20 °С і 150 °С наведена на рис. 12.2–12.3.

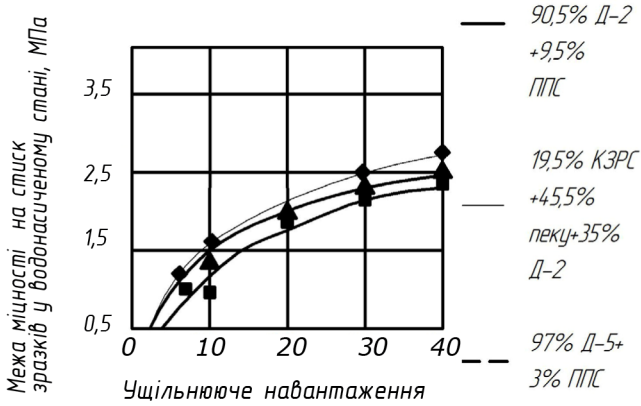


Рис. 12.2. Залежність міцності на стиск зразків у водонасиченому стані від ущільнювального навантаження

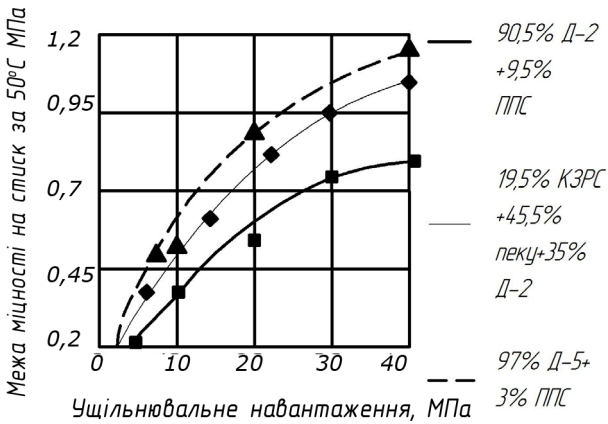


Рис. 12.3. Залежність міцності на стиск за 50 °С від ущільнювального навантаження

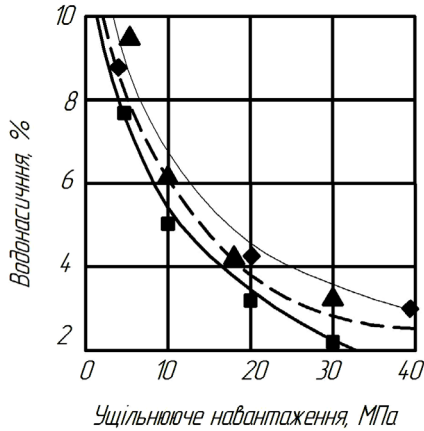


Рис. 12.4. Залежність водонасичення від ущільнювального навантаження

Залежність фізико-механічних властивостей дьогтеполімербетону від температури наведена в табл. 12.1.

Таблиця 12.1

Вплив температур приготування суміші і її ущільнення на властивості дьогтеполімербетонів

Найменування показників	Температура приготування й ущільнення сумішей, °С		
	80	100	120
В'язуче: 19,5 % КРС+45,5 % пеку +35 % дьогтю Д-5			
Середня щільність, г/см ³	2,39	2,40	2,40
Водонасичення, %	2,53	2,55	3,01
Набрякання, %	0,42	0,25	0,26
Межа міцності на стиск, МПа:			
за температури 20 °С	2,20	2,70	4,40
за температури 50 °С	0,80	1,00	1,20
після водонасичення	1,60	2,60	4,10
В'язуче: 5,5 % ППС+94,5 % дьогтю Д-6			
Середня щільність, г/см ³	2,39	2,40	2,41
Водонасичення, %	2,10	1,70	1,50
Набрякання, %	0,20	0,20	0,0
Межа міцності на стиск, МПа:			
за температури 20 °С	2,40	2,70	3,80
за температури 50 °С	0,80	0,90	1,10
після водонасичення	2,20	2,50	3,50

Оптимальна температура приготування та ущільнення дьогтеполімербетону – 120 °С, тобто за цієї температури зразки мають найвищі фізико-механічні властивості. Це свідчить про те, що процеси фізико-хімічної взаємодії між твердою і рідкою фазами в таких сумішах найбільш інтенсивно перебігають за температури не нижчої як 100 °С.

Величина ущільнювального навантаження є оптимальною у межах від 20 до 40 МПа. Термін зберігання дьогтеполімербетонних сумішей у бункерах-накопичувачах збільшується до 8 годин (для дьогтебетонних сумішей 4–5 годин).

12.3. Цементополімербетон, його складові компоненти та властивості

Отримання цементополімербетонів підвищеної міцності та тріщиностійкості можливе тільки з додаванням у суміш комплексних модифікаторів поліфункціональної дії. Основними складовими цих модифікаторів є суперпластифікатор (СП) та активна мінеральна домішка на зразок мікрокремнезему (МКр) та мікрокаоліну (МК) або метакаоліну (МТк).

Фізико-механічні властивості цементополімербетону визначають на зразках-призмах і зразках-кубах. Зазвичай, визначають міцність на стиск (R), призмову міцність ($R_{пр}$), міцність на осьовий розтяг ($R_{ор}$) та розтяг на згин ($R_{зг}$), модуль пружності (E_0).

Склад і фізико-механічні властивості бетону з домішкою модифікатора на основі суперпластифікатора та мікрокаоліну наведені в табл. 12.2, 12.3.

Таблиця 12.2

Склад бетону

№	В/Ц	В/В'яз	Основні компоненти, кг/м ³				Домішки, % в'яз/кг/м ³	
			Вода	Цемент	Пісок	Щебінь	СП	МТк
1	0,40	0,40	200	500	610	1105	0,5/2,5	–
2	0,42	0,40	200	475	608	1101	0,55/2,75	5/25
3	0,44	0,40	200	450	606	1097	0,75/3,75	10/50
4	0,38	0,34	170	450	634	1149	1,35/6,75	10/50

Примітка. В/в'яз – співвідношення між витратою води і сумарною витратою цементу, метакаоліну (МТк) та суперпластифікатора (СП).

Пісок кварцовий (з модулем крупності) Мк– 2, щебінь гранітний, суміш фракцій 5–10 мм – 40% та 10–20 мм – 60 %.

Таблиця 12.3

Фізико-механічні характеристики бетонів

№	n , діб	R , МПа	$R_{пр}$, МПа	$K_{п.м.}$	$R_{о.р.}$, МПа	$R_{зг}$, МПа	$E_{б} \cdot 10^{-3}$, МПа	$E_{д} \cdot 10^{-3}$, МПа
1	3	28,9	–	–	1,98	2,90	–	–
	7	40,7	32,6	0,80	2,47	3,87	31,13	42,30
	28	53,6	43,4	0,81	2,87	4,76	37,73	45,12
2	3	29,3	–	–	2,14	3,15	–	–
	7	39,5	32,0	0,81	2,57	4,07	36,62	41,97
	28	56,0	47,0	0,84	3,09	5,11	42,35	45,53
3	3	33,2	–	–	2,11	3,76	–	–
	7	44,1	37,5	0,85	2,62	4,81	38,18	43,16
	28	63,9	56,2	0,88	3,15	6,2	44,72	46,70
4	3	48,4	–	–	2,75	4,85	–	–
	7	65,0	56,6	0,87	3,06	5,06	40,15	46,85
	28	83,4	74,2	0,89	3,73	6,62	46,35	48,79

Використання суперпластифікатора покращує деформативні властивості цементополімербетону, збільшує міцність на розтяг за згину ($R_{зг}$) і стиску (R_c), сприяє відповідності отриманих значень модуля пружності розрахунковим.

Питання для самоконтролю



1. Які реологічні властивості асфальтового бетону?
2. Опишіть властивості дьогтеполімербетону.
3. Які фізико-механічні властивості цементополімербетону?

Розділ 13. ХОЛОДНИЙ АСФАЛЬТОВИЙ БЕТОН

Холодний асфальтовий бетон є різновидом асфальтового бетону, що виготовляють у гарячому стані за температури 110–120 °С, але укладають у холодному вигляді (за температури навіть 0 °С).

Для приготування холодного асфальтобетону використовують рідкі бітуми, розріджені бітуми або бітумні емульсії.

Для розрідження бітумів використовують лігроїн або бітумний сольвент.

У разі використання бітумних емульсій виготовлення холодного асфальтобетону відбувається без перегрівання мінеральних матеріалів (за температури зовнішнього середовища).

Холодні асфальтобетонні суміші залежно від вмісту щебеню, гравію чи піску поділяють на такі типи: Бх – містить 35–50 % крупного заповнювача щебеню (Щ), гравію (Г); Вх – 20–35 (Щ(Г)); Гх – з використанням дрібного піску або висівок; Дх – з використанням природного піску.

Холодні асфальтобетонні суміші типів Бх і Вх поділяють на марки: І і ІІ; Гх – можуть бути тільки І марки; Дх – марки ІІ.

Холодний асфальтовий бетон може використовуватись для укладання покриттів проїзної частини доріг і вулиць, як товщиною 4–5 см, так і тонкошарових товщиною до 2 см, але частіш за все – для ямкового ремонту.

Позитивними властивостями холодного асфальтобетону є такі:

- стійкість покриттів до утворення тріщин, мала пластичність і високий коефіцієнт внутрішнього тертя. Це пояснюється високою в'язкістю бітуму, що входить до складу холодного асфальтобетону. Такі покриття стійкі до утворення пластичних деформацій (хвиль, зсувів, колій) внаслідок меншого вмісту бітуму (5–7 %, розчинника 12–22 %);

- зберігання пухкості суміші (незлежуваність) довгий час (до 8 місяців), що зумовлює можливість виготовлення холодних асфальтобетонних сумішей протягом усього року і полегшує його транспортування на значні відстані будь-яким видом транспорту;

- виконання робіт з улаштування покриття з холодних асфальтобетонних сумішей можливе за нижчих температур (0 °С), ніж у

разі використання гарячого асфальтобетону (не нижче ніж 5 °С), що дає можливість продовжити будівельний сезон;

– укладання холодних асфальтобетонних сумішей у покриття без підігрівання забезпечує раціональне використання технології виконання робіт. Підігрівання суміші до 50–60 °С здійснюють тільки в холодний (зимовий) період;

– ущільнення холодних асфальтобетонних сумішей у покриттях відбувається поступово, протягом кількох місяців за сумісної дії атмосферних факторів і руху автотранспорту дорогою. У міру ущільнення зростає його міцність завдяки меншій товщині бітумної плівки на зернах мінерального матеріалу. При цьому, тут відбувається підвищення в'язкості бітуму за рахунок випарювання летких складових, окислювальної полімеризації, а також процес складної фізико-хімічної взаємодії між мінеральними та в'язкими матеріалами, у результаті якої підвищується їх взаємне зчеплення.

У зв'язку з використанням у холодному асфальтобетоні рідких бітумів для забезпечення необхідної міцності до складу вводять більшу кількість мінерального порошку до 12–15 % (у гарячому вигляді 7–8 %). Це сприяє формуванню щільної і міцної структури в покритті. Середня щільність холодного асфальтобетону 2300–2400 кг/м³.

Фізико-механічні властивості холодного асфальтобетону повинні відповідати вимогам ДСТУ Б В.2.7-119-2003. Їх характеризують такі показники: міцність на стиск, коефіцієнт водостійкості, набрякання, пористість, що оцінюють за величиною водонасичення і злежуваність. Фізико-механічні показники холодного асфальтобетону наведені в табл. 13.1.

Таблиця 13.1

Фізико-механічні властивості холодних асфальтобетонів різних типів

Найменування показників	Норми для асфальтобетонів марок	
	I	II
1. Пористість мінерального кістяка, % за об'ємом, для асфальтобетонів із сумішей типів:		
Бх, не більша	18	18
Вх, не більша	20	20
Гх і Дх, не більша	21	21

Закінчення табл. 13.1

Найменування показників	Норми для асфальтобетонів марок	
	I	II
2. Залишкова пористість, % за об'ємом, для асфальтобетонів із сумішею усіх типів	6–10	6–10
3. Водонасичення до прогрівання, % за об'ємом, для асфальтобетонів із сумішею усіх типів	5–9	5–9
4. Набрякання до прогрівання, % за об'ємом, для асфальтобетонів із сумішею усіх типів, не більше	1,2	2,0
5. Межа міцності на стиск, МПа, за температури 20°C: до прогрівання асфальтобетонів із сумішею усіх типів:		
Бх, Вх, не менша	1,5	1,3
Гх, не менша	1,7	–
Дх, не менша	–	1,2
Після прогрівання асфальтобетонів із сумішею усіх типів:		
Бх, Вх, не менше	1,8	1,6
Гх, не менше	2,0	–
Дх, не менше	–	1,5
6. Коефіцієнт водостійкості до прогрівання, не менший	0,75	0,60
7. Коефіцієнт водостійкості після прогрівання, не менший	0,90	0,80
8. Коефіцієнт довготривалої водостійкості до прогрівання, не менший	0,50	0,40
9. Коефіцієнт довготривалої водостійкості після прогрівання, не менший	0,75	0,65
10. Злежуваність за кількістю ударів, не більша	10	10

Важливим показником холодного асфальтобетону є зносостійкість (стиранність), яка залежить від в'язкості та кількості бітуму, та зменшується за збільшення його вмісту в суміші.

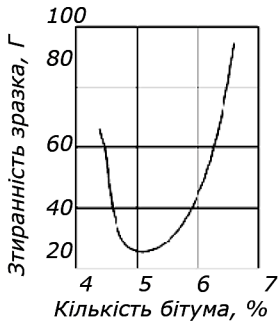


Рис. 13.1 Залежність зносостійкості холодного асфальтобетону від кількості бітуму

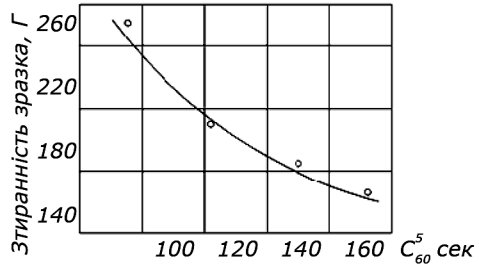


Рис. 13.2 Залежність стиранності холодного асфальтобетону від в'язкості бітуму

Несприятливим для роботи холодного асфальтобетону в покритті є період найбільшого зволоження, коли вода потрапляє в пори матеріал і асфальтобетон значно знижує міцність і водостійкість.

До недоліків холодного асфальтобетону відносять:

- подовжений період ущільнення і формування шару, у зв'язку з чим щільність у початковий період після укладання низька;
- знижена водо- та зносостійкість;
- неможливість використання кам'яних матеріалів отриманих із кислих гірських порід (вода, що насичує пори асфальтобетону буде послаблювати зчеплення бітуму з поверхнею мінеральних часток, і тонка плівка в'язучої речовини буде поступово відшаровуватись і витіснятися водою).

Холодний асфальтобетон на бітумних емульсіях. Для виготовлення холодного асфальтобетону використовують частіш за все катіоактивні середньо- та повільно розпадні емульсії. Для виготовлення холодного асфальтобетону, для якого як в'язучу речовину використовують бітумну емульсію, краще застосовувати мінеральні матеріали й особливо мінеральний порошок з природною вологістю або матеріали, оброблені водою до залишкової вологості (2–4 % за масою) для попередження швидкого поглинання води з емульсії і забезпечення кращого розподілення залишкового бітуму по поверхні мінерального матеріалу. Вміст емульсії в суміші визначають, виходячи з оптимального вмісту бітуму з урахуванням масової частки емульсії, яка складає 55–65 %. За збільшення або

зменшення масової частки емульсії знижується якість асфальтобетонної суміші, яка може бути покращена попереднім обробленням мінеральних складових домішками латексу, полівінілацетатною емульсією та ін. Для забезпечення рівномірного розподілення бітумної емульсії в суміші, її вводять перед подаванням мінерального порошку. Час перемішування суміші залежить від вологості матеріалів, вмісту емульсії і складає, орієнтовно, 30–40 секунд.

Виготовлення холодного асфальтобетону як на рідкому бітумі так і на емульсії, відбувається в асфальтобетонних змішувачах з вимкненням підігрівального обладнання або в бітумозмішувачах.

Холодний асфальтобетон, який виготовляють з використанням бітумної емульсії, не можна зберігати, оскільки відбувається розпад емульсії і об'єднання бітуму з матеріалами. Це може викликати злипання суміші. Тому суміш необхідно відразу використовувати для укладання дорожніх покриттів. Такі суміші можна укласти за вологої погоди, тобто одразу після дощу, не чекаючи на висихання поверхні нижчерозташованого конструктивного шару дорожнього одягу.

Ущільнення суміші відбувається після розпаду емульсії з допомогою легких котків, а потім пневмокотків чи віброкотків. Формування покриття відбувається практично одразу після ущільнення, розпаду емульсії і випаровування води. Покриття з холодного асфальтобетону з використанням бітумної емульсії мають підвищену тріщиностійкість і вищу міцність у літній період ніж з рідких бітумів.

Питання для самоконтролю



1. Які позитивні властивості холодного асфальтобетону вам відомі?
2. Назвіть фізико-механічні властивості холодного асфальтобетону.
3. Які недоліки холодного асфальтобетону?
4. Як готують холодну асфальтобетонну суміш?

Розділ 14. СПЕЦІАЛЬНІ ВИДИ АСФАЛЬТОБЕТОНІВ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬ У ДОРОЖНЬОМУ БУДІВНИЦТВІ

Литий асфальтобетон являє собою матеріал аналогічний до гарячого асфальтобетону, але відрізняється більшим вмістом в'язучого бітуму (близько 15 %) і мінерального порошку (близько 25 %), іноді технологією приготування й укладання (вищою температурою приготування й укладання). Особливістю будівництва покриттів із литого асфальтобетону є те, що він не потребує ущільнення шару. Укладений шар суміші після вистигання досягає необхідної щільності.

За даними дослідників, литий асфальтобетон є найбільш довговічним з усіх асфальтобетонів через високу щільність, є корозійностійким, водонепроникним, менше зношується. Однак у зв'язку з тим, що в його складі незначний вміст щебеню, його характеризують знижена зсувостійкість і поява незначних пластичних деформацій.

Оскільки об'єм асфальтов'язучої речовини (бітум та мінеральний порошок) у литому асфальтобетоні значно більший ніж у інших його видах, його зсувостійкість більшою мірою визначається структурно-механічними властивостями, і зокрема в'язкістю всієї системи, яка своєю чергою залежить від в'язучих бітуму і ступеню його структуроутворення мінеральним порошком. Цим зумовлено використання в литому асфальтобетоні більш в'язучих бітумів і більшої кількості мінерального порошку. Використання бітумів підвищеної в'язкості призводить до утворення на покритті тріщин. Виникнення тріщин пов'язане з перегріванням литої асфальтобетонної суміші протягом її приготування і транспортування. Окрім того, поява тріщин спостерігається протягом укладання литого асфальтобетону на цементобетонну основу. Тріщиноутворення зростає в зимових умовах (за низьких температур) унаслідок підвищеної кількості бітуму в суміші. Це зумовлює вищий коефіцієнт об'ємного температурного розширення асфальтобетону, підвищену в'язкість суміші та більший ступінь структуроутворення бітуму мінеральним порошком. Важливе значення для використання литого асфальтобетону має стан поверхні та якість нижнього шару.

Структура цього шару повинна попереджувати появу здуття (пухирів), які часто з'являються між шаром основи та покриття, особливо впродовж укладання покриття на цементобетонній основі, або на вологому та щільному проміжному шарі.

Виникнення пухирів відбувається внаслідок накопичування водяних парів (волога, що випаровується з цементобетонної основи) під повітрянепроникним литим асфальтобетоном. Для попередження утворення здуття литий асфальтобетон укладають на нижній шар із бітумомінерального матеріалу з підвищеною залишковою пористістю.

Залежно від крупності зерен мінерального матеріалу литий асфальтобетон поділяють на піщаний з максимальним розміром зерен 5 мм і щебневий – 10–15 мм. Кількість щебеню в щебенистому литому асфальтобетоні складає 45–50 %.

Необхідної шорсткості поверхні покриття досягають шляхом збільшення кількості щебеню або втоплюванням у поверхневий шар покриття щебеню (фракцією не більшою як 10 мм). Другий спосіб використовують частіше.

Приготування литого асфальтобетону здійснюють в пересувних змішувачах з лопатевими мішалками або в звичайних змішувачах з примусовим перемішуванням.

Литий асфальтобетон призначений для укладання верхнього шару асфальтобетонного покриття на дорогах і аеродромах усіх категорій і значення. Товщина шару складає 3,5–4,5 см.

Найбільш доцільне його застосування в тих випадках, коли необхідно укласти покриття за знижених температур (до $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$) або коли необхідно забезпечити водонепроникність покриття (наприклад, на мостах). Литий асфальтобетон успішно використовують для укладання покриттів у місцях важкодоступних для ущільнювальних механізмів.

14.1. Лита бітумо-полімерна композиція для укладання тонкошарових покриттів

До традиційних тонкошарових покриттів автомобільних доріг і аеродромів відносять шари товщиною 2–2,5 см, які укладають із гарячих асфальтобетонів з додаванням полімерних домішок (асфальтополімербетон) або бітумно-полімерних сумішей з наповнювачами. Такі матеріали використовують для ремонту доріг і міських вулиць

для підвищення шорсткості наявного асфальтобетонного покриття і забезпечення безпеки дорожнього руху (коефіцієнт зчеплення повинен бути $K=0,35$ згідно з ДСТУ 3587–97).

В останні роки в Україні розроблена лита бітумно-полімерна композиція (суміш) для підвищення шорсткості наявного асфальтобетонного покриття, яка являє собою однокомпонентну мікробітумополімерну суміш чорного кольору, виготовлену з мінеральних наповнювачів і бітуму з додаванням полімерів.

Для виготовлення бітумно-полімерної композиції (суміші) використовують мінеральний матеріал фракцією – 0–5 мм, в'язучий бітум пенетрацією 60/70. Уведення полімерних домішок дозволяє покращити корозійну стійкість суміші, адгезію до наявного покриття. Додавання мінерального матеріалу фракцією 0–5 мм забезпечує нормативний коефіцієнт зчеплення колеса автомобіля з покриттям. Товщина шару нанесення 1,0–1,5 см.

Вартість таких покриттів у 1,2–2,0 рази нижча ніж традиційно укладених, а довговічність завдяки модифікації в'язучої речовини наближається до нормативної.

Фізико-механічні властивості литої бітумно-полімерної композиції (суміші) на основі полімеру поліетилену та наповнювача – базальтової крихти – наведені в табл. 14.1.

Таблиця 14.1

Фізико-механічні властивості зразків бітумно-полімерної композиції

Найменування показників	Результати досліджень	
	№1 (без наповнювача)	№2 (з базальтовою крихтою)
Адгезія (прилипання)	4,0	4,0
Температура розм'якшення, °C	54,0	56,0
Температура крихкості, °C	-6,0	-7,0
Водонепроникність, %	0,0	0,0
Стійкість до дії агресивних середовищ, % після кіп'ятіння протягом 3-х годин		
2NaOH (луги)	99,8	99,7
0,5H ₂ SO ₄ (кислоти)	85,8	85,0
Випробування в камері штучного клімату протягом 600 годин (5 років роботи матеріалу в натурних умовах експлуатації)	Витримує без зовнішніх змін, на поверхні немає тріщин, викришунвань	

Завдяки активній газовій складовій, уведеній до складу полімеру поліетилену, бітумно-полімерна композиція після нанесення на поверхню наявного асфальтобетонного покриття, проникає в пори на глибину приблизно 4 см, вступає в хімічні зв'язки з бітумом нижче від розташованого шару, утворюючи полімерно-бітумну плівку, яка має пластично-пружні властивості. Як наповнювач можна використовувати базальтову або гранітну крихту.

Для визначення зчпних якостей покриття з бітумно-полімерної композиції був використаний маятниковий прилад МП-3. Дослідження проводились на ділянках з нанесенням цього матеріалу та без нанесення. Результати випробувань наведені в табл. 14.2.

Таблиця 14.2

Вивчення зчпних якостей за нанесення бітумно-полімерної композиції

Найменування матеріалу	Щебенево-мастиковий асфальтобетон		Дрібнозернистий асфальтобетон	
	волога поверхня	суха поверхня	волога поверхня	суха поверхня
№ вимірювання	1	2	3	4
Покриття еталонне (без нанесення)	0,36	0,39	0,34	0,36
Бітумно-полімерна композиція без базальтової крихти	0,40	0,42	0,37	0,39
Бітумно-полімерна композиція з базальтовою крихтою	0,44	0,46	0,40	0,42

Аналізуючи дані табл. 14.2 бачимо, що покриття з нанесеною бітумно-полімерною композицією стає більш шорстким, що забезпечує збільшення коефіцієнта зчеплення з колесом автомобіля.

Для вивчення впливу бітумно-полімерної композиції на зміну властивостей асфальтобетонної суміші були заформовані зразки асфальтобетону (тип Б II марка) і виконані випробування. Результати наведені в табл. 14.3.

Зміна властивостей асфальтобетонної суміші за нанесення бітумно-полімерної композиції

№	Середня щільність, кг/м ³	Водонасичення, %	Межа міцності на стиск, МПа, за температури			Коефіцієнт		Коефіцієнт морозостійкості після 25 циклів	
			0 ⁰ С	20 ⁰ С	50 ⁰ С	водостійкості	тривалості водостійкості	у воді	у 5% NaCl
1	2,25	3,3	12,2	3,4	2,8	0,98	0,81	0,86	0,83
2	2,25	2,4	11,5	4,8	2,3	0,99	0,96	0,93	0,95
3	2,25	2,8	10,8	4,2	1,9	0,99	0,93	0,91	0,92

Примітка. 1 – склад без бітумно-полімерної композиції, еталонні асфальтобетонні зразки; 2 – склад з бітумно-полімерною композицією з базальтовою крихтою; 3 – склад з бітумно-полімерною композицією без базальтової крихти.

Для визначення можливого впливу бітумно-полімерної композиції на процеси старіння асфальтобетону зразки випробували в камері штучного клімату типу “Feutron”, де 120 годин випробування дорівнює 1-му року експлуатації покриття.

Після 120, 360 і 600 годин визначають міцність на стиск за $t + 20^{\circ}\text{C}$. Результати випробувань наведені на рис. 14.1.

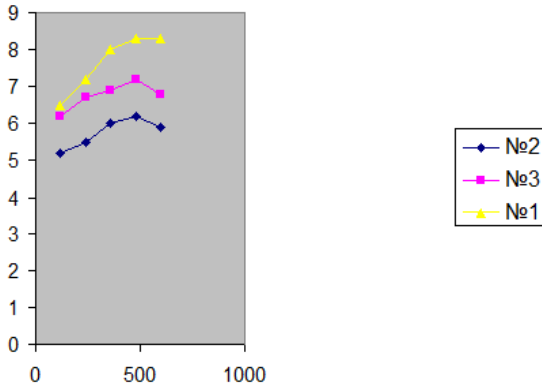


Рис. 14.1. Зміна властивостей асфальтобетону в камері штучного клімату № 1 – еталонний зразок асфальтобетону; № 2 – склад з бітумно-полімерною композицією з базальтовою крихтою; № 3 – склад з бітумно-полімерною композицією без базальтової крихти

14.2. Дисперсно-армований асфальтобетон

Дисперсно-армований асфальтобетон є композиційним матеріалом, до складу якого, окрім мінеральних матеріалів (щебеню, піску та мінерального порошку) і бітуму, уведено армувальні волокна (фібри), що підвищують тріщиностійкість, опір утомленості й удару, міцність на згин і зсувостійкість дорожніх покриттів.

Волокна, що використовують для армування асфальтобетону, подібні до тих, які додають у цементобетонну суміш, а саме: азбест, сталь, полімерні, скло- та базальтові. Але тут необхідно враховувати, що можливе використання тільки тих полімерних волокон, у яких температура плавлення знаходиться в межах 170–180 °С, тобто вища за температуру приготування гарячої асфальтобетонної суміші (140–160 °С), для того, щоб попередити їх плавлення в процесі перемішування. Наприклад, поліамід, полівінілхлорид тощо.

Довжина волокна (фібри) не повинна бути меншою ніж 4 мм і більшою за 5 мм, для забезпечення рівномірного розподілення волокна у суміші.

Кількість фібри у суміші складає 1–2 % від маси мінерального порошку.

Додавання волокон не призводить до ускладнення технологічного процесу приготування асфальтобетонної суміші. Єдине, необхідно проводити дообладнання бункером для подавання волокон безпосередньо в змішувач. Під час приготування дисперсно-армованого асфальтобетону волокна подають у змішувач після подавання всіх мінеральних складових, відбувається так зване «сухе» перемішування всіх мінеральних складових і волокон протягом 10–20 сек, а потім – уведення бітуму та перемішування протягом 30–35 сек.

В Україні проводили дослідження використання базальтових волокон двох видів: грубих (ГБВ) і тонких (ТБВ), які показали позитивні результати. Уведення базальтових волокон створює ефект мікроармування в суміші, й асфальтобетон характеризується високим опором розтягу і зсуву. У міру ущільнення асфальтобетонної суміші базальтові волокна оплітають частки мінерального матеріалу, з'єднуються одна з одною й утворюють матрицю з переплетених волокон.

Для підтвердження позитивного впливу базальтових волокон проводили дослідження втомленості асфальтобетону, яка відбувається у разі вигинання покриття під дією повторних навантажень від коліс автомобілів і є однією з причин виникнення тріщин на покритті. Дослідження показали, що армування асфальтобетону базальтовими волокнами як грубими (ГБВ), так і тонкими (ТБВ) підвищують міцність на втомленість, яка збільшується у дрібнозернистого асфальтобетону в 1,6 рази і піщаного – в 1,4 рази, тобто збільшитися тріщиностійкість покриття з дисперсно-армованого асфальтобетону.

Використання дисперсно-армованого асфальтобетону дозволяє підвищити міцність на розтяг на 40–50 %, на зсув на 30–40 %, знизити появу відображених тріщин на 30–50 % порівняно з традиційним асфальтобетоном. Уведення армувальних волокон сприяє зменшенню товщини шару дисперсно-армованого асфальтобетону на 20–25 % і підвищенню терміну служби дорожнього одягу в 1,5 рази.

Окрім того, використання дисперсно-армованого асфальтобетону дає можливість продовжити міжремонтні терміни служби дорожнього одягу та виконувати нові ремонтні роботи пізніше терміну, встановленого нормативними документами. Незважаючи на те, що у разі застосування волокон першочергові витрати можуть бути дещо вищими (за рахунок вартості волокон) і супроводжуватись певними ускладненням технології приготування суміші, такий асфальтобетон значною мірою забезпечує зниження сумарних витрат на ремонт і експлуатаційне утримання дорожніх одягів.

14.3. Щебенево-мастиковий асфальтобетон

Щебенево-мастиковий асфальтобетон (ЩМА) являє собою моноклітний матеріал, що утворюється після ущільнення та вистигання до температури довкілля щебенево-мастикової суміші, яку отримують перемішуванням у нагрітому стані суміші мінеральних матеріалів (щебеню, піску (відсіву) і мінерального порошку), стабілізаційної домішки та нафтового дорожнього бітуму або бітумнополімерного в'язучої речовини, узятих у заданих співвідношеннях. Високий вміст міцного щебеню кубовидної форми (70–80 %) у складі мінеральної частини ЩМА створює каркасну структуру та забез-

печує підвищення зсувостійкості покриття з такої асфальтобетонної суміші за високих літніх температур. Підвищений вміст бітуму у складі ЩМА, порівняно з традиційним гарячим дрібнозернистим асфальтобетоном, забезпечує утворення на поверхні зерен мінерального матеріалу товстої плівки в'язучої речовини, яка сприяє високій довготривалій водостійкості та морозостійкості асфальтобетонного покриття. Головне призначення стабілізуючої домішки – запобігати розшаруванню щебенево-мастиківної суміші за її транспортування, укладання й ущільнення завдяки структурувальній дії на бітум та підвищенню його здатності утримувати товстіші плівки в'язучої речовини на поверхні зерен щебеню. Як стабілізаційні домішки у ЩМА найбільше використовують целюлозні та полімерні волокна. Целюлозні волокна застосовують у гранульованому вигляді у кількості 0,3–0,4 % (більш за 100 % за масою суміші).

Товщину покриття із ЩМА розраховують як для традиційного асфальтобетону відповідно до ВБН В.2.3–218–186–2004 «Дорожній одяг нежорсткого типу» та технічних умов ДСТУ Б В.2.7–127:2006 «Суміші асфальтобетонні й асфальтобетон щебенево-мастиківний».



Рис. 14.2. Загальний вигляд целюлозних гранул

Згідно з ДСТУ Б В.2.7–127:2006 щебенево-мастиківний асфальтобетон поділяють на такі різновиди:

- ЩМА-20 – з максимальним розміром зерен 20 мм;
- ЩМА-15 – з максимальним розміром зерен 15 мм;
- ЩМА-10 – з максимальним розміром зерен 10 мм;
- ЩМА-5 – з максимальним розміром зерен 5 мм.

Щебенево-мастиківний асфальтобетон завдяки своєму складу має набагато більший термін служби порівняно з гарячим асфаль-

тобетоном типу «А», оскільки містить значний відсоток асфальтов'язучої речовини, у якому співвідношення бітум-мінеральний порошок вище. Збільшений вміст щебеню крупних фракцій (10–20 мм) забезпечує стійкість до утворення деформацій покриття в літній період експлуатації навіть на тих дорогах, якими рухається значна кількість автотранспортних засобів зі значним навантаженням на вісь.

Завдяки високій кількості щебеню крупних фракцій утворюється значна кількість міжзернових зв'язків, що сприяє міцності щебеневого каркасу.

Завдяки значній кількості бітуму, його в'язкість можна варіювати без зниження стійкості ЩМА до колієутворення.

За температурною стійкістю ЩМА, за будь-якої в'язкості бітуму, наприклад, у межах 40–120 °П буде мати значний коефіцієнт запасу міцності ($K_{з.м.}$). Так, за в'язкості бітуму 42 °П – $K_{з.м.} = 0,96$, а за 120 °П – $K_{з.м.} = 0,98$.

Для забезпечення довговічності шару щебенево-мастикового асфальтобетону необхідно враховувати, що його структура (мезоструктура) зазнає значно більшого негативного впливу високих температур порівняно з традиційним гарячим асфальтобетоном, тому необхідно ретельно дотримуватись точності дозування складових компонентів.

Взагалі, ЩМА має переваги як литого асфальтобетону (підвищена температура й уповільнення старіння, тріщиностійкість, корозійна стійкість), так і гарячого багатощебеневого асфальтобетону типу «А» (підвищені міцнісні показники).

14.4. Фрезерований асфальтовий бетон

Фрезерований асфальтовий бетон – це асфальтовий дрібняк, який отримують у процесі холодного фрезерування старих асфальтобетонних покриттів або шарів поверхневого оброблення, і який можна використовувати повторно.

У 80 % випадків у містах верхні шари асфальтобетонного покриття укладають із дрібнозернистого асфальтобетону типу «В», тому гранулометричний склад мінеральної частини фрезерованого дрібняку з різних вулиць практично однотипний.

Основними напрямками повторно використання асфальтобетону є такі:

- як складового матеріалу для гарячих асфальтобетонних сумішей;
- виготовлення холодних органомінеральних сумішей;
- укладання нижніх шарів дорожнього одягу;
- розклинцювання щобєневих шарів;
- зміцнення узбіччя.

Питання для самоконтролю



1. Які спеціальні види асфальтобетонів використовують у дорожньому будівництві?
2. Схарактеризуйте тонкошарві покриття автомобільних доріг і аеродромів.
3. Що таке дисперсно-армований асфальтобетон?
4. Що таке щобєнево-мастиковий асфальтобетон?

ЛІТЕРАТУРА

Основна

1. *Шестоперов С. В.* Дорожно-строительные материалы; учебник для ВУЗов / С. В. Шестоперов. – М. : Высшая школа, 1969. – 672 с.
2. *Краснов А. М.* Физико-химические основы технологии дорожно-строительных материалов: учебн. пособие / А. М. Краснов. – Йошкар-Ола.: МарПИ, 1993. – 112 с.
3. *Братчун В. И.* Физико-химическая механика строительных материалов / В. И. Братчун, В. А. Золотарев. – Харьков. – 2008.
4. *Строительное материаловедение.* Учебник / П. В. Кривенко, К. К. Пушкарева, В. Б. Барановский, М. А. Кочевых, Ю. Г. Гасан, Б. Я. Константиновский, В. А. Ракша. – К. : Основа, 2007. – 704 с.
5. *Пащенко А. А.* Вяжущие материалы / А. А. Пащенко, В. П. Сербин, Е. А. Старческая. – К. : Высшая школа, 1975. – 444 с.
6. *Тейлор Х.* Химия цемента / Х. Тейлор. – М., 1998. – 600 с.
7. *Ратинов В. Б.* Добавки в бетоны / В. Б. Ратинов, Е. И. Розенберг. – М. : Стройиздат, 1989. – 207 с.
8. *Волянський О. А.* Технологія бетонних і залізобетонних конструкцій: підручник у 2-х ч. Ч.І. Технологія бетону / О. А. Волянський. – К. : Вища школа, 1994. – 271 с.
9. *Рыбьев И. А.* Асфальтовые бетоны / И.А. Рыбьев. – М. : Высшая школа, 1969. – 245 с.
10. *Гунн Р. Б.* Нефтяные битумы / Р.Б. Гунн. – М. : Химия. 1973. – 429 с.
11. *Дорожный асфальтобетон* / под ред. Л. Б. Гезенцева. – М. : Транспорт, 1976. – 334 с.
12. *Печень Б. Г.* Долговечность битумных и битумно-минеральных покрытий / Б. Г. Печень. – М. : Стройиздат, 1981. – 123 с.
13. *Кучма М. И.* Поверхностно-активные вещества в дорожном строительстве / М. И. Кучма. – М. : Транспорт, 1980. – 191 с.
14. ДБН В.2.3-4:2007 Споруди транспорту. Автомобільні дороги. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво. – К. : Мінрегіонбуд України, 2007.
15. ДБН Д.2.2-31-99 Аеродроми: зб. 31 – К. : Державний комітет будівництва, архітектури та житлової політики України, 2000.
16. *Веренько В. А.* Дорожные композиционные материалы. Структура и механические свойства / В. А. Веренько. – М. : Наука и техника, 1993. – 243 с.

17. *Плотникова И. А.* Влияние различных факторов на дисперсность эмульсий и паст // Тр. Союздор НИИ / И. А. Плотникова. – 1972. – Вып. 57. – С. 60–69.

18. *Подвальный О. М.* Физико-химическая механика – основа научных представлений о коррозии бетона и железобетона // Бетон и железобетон / О. М. Подвальный. – 2000. – №5. – С. 23–27.

19. *Круглицкий Н. Н.* Очерки по физико-химической механике / Н. Н. Круглицкий. – К., 1988.

Додаткова

20. *Колісник Д. Ю.* Радіаційно-хімічна модифікація бетону функціональними силіконами / Д. Ю. Колісник. – К. : ТОВ «НВП «Інтерсервіс», 2014. – 146 с.

21. ДБН В.2.7-64-97 Правила застосування хімічних добавок у бетонах і будівельних розчинах. – К. : Держбуд України, 1999. – 60 с.

22. *Takahashi F., Shimaoka T., Gardner K., Kida A.* Size-depended enrichment of waste slag aggregate fragments abraded from asphalt concrete. Journal of Harardous Materials 194: 209-215 [http: dx.doi Org.10.1016 jhazmat. 2011 11.07.086](http://dx.doi.org/10.1016/jhazmat.2011.11.07.086)

23. *Wang G., Trompson R.G., Wang J* 2011 Hot-mix asphalt that contains nickel slag aggregate. Transportation Research Record 2208¹-8/

24. *Zariijs A.* 2011 System analysis of information reception and processing for driving task. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering 6 (1) 12-16 [http: dx.doi Org.10.3846 bjzbe.2011.02](http://dx.doi.org/10.3846/bjzbe.2011.02)

25. *Краюшкіна К. В.* Влияние свойств асфальтобетонных покрытий со шлаковыми материалами на транспортно-эксплуатационные показатели автомобильных дорог. Дисс. на соискание ученой степени / К. В. Краюшкіна. – Вильнюс. Техника 2013. – 179 с.

26. *Краюшкіна К. В.* Підвищення шорсткості і довговічності покриттів автомобільних доріг за рахунок застосування бітумно-полімерних композицій. Проблеми розвитку міського середовища. – К. – С. 122–126.

27. *Krayushkina K., Prentkovskis O., Bieliatynskiy A. Junevicius R.* 2012 Use of steel slags in automobile road construction. Transport 27/2. – P. 129–137

28. *Каргин В. А.* Краткие очерки по физико-химии полимеров / В.А. Каргин, Г.Д. Солонимский. – М. : Химия, 1967. – 142 с.

29. *Беженев М. Ю.* Технология бетона / М. Ю. Беженев. – М., 1987.

Навчальне видання

БЄЛЯТИНСЬКИЙ Андрій Олександрович
КРАЮШКІНА Катерина Вікторівна

**ФІЗИКО-ХІМІЧНА МЕХАНІКА
ДОРОЖНЬО-БУДІВЕЛЬНИХ
МАТЕРІАЛІВ**

Навчальний посібник

Технічний редактор *А. І. Лавринович*
Комп'ютерна верстка *Н. С. Ахроменко*

Підп. до друку 12.12.2016. Формат 60x84/16. Папір офс.
Офс. друк. Ум. друк. арк. 14,18. Обл.-вид. арк. 15,25.
Тираж 100 пр. Замовлення № 183-1.

Видавець і виготівник
Національний авіаційний університет
03680. Київ-58, проспект Космонавта Комарова, 1

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 977 від 05.07.2002