



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**ПІВНІЧНО-СХІДНИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР
ТРАНСПОРТНОЇ АКАДЕМІЇ УКРАЇНИ**

**УКРАЇНСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ
УКРАЇНСЬКОЇ ДЕРЖАВНОЇ АКАДЕМІЇ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

Випуск 138

Харків 2013

УДК 691.075:541.18

До збірника увійшли обрані праці 4-ї Міжнародної науково-технічної конференції з будівельних матеріалів, конструкцій і споруд «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті», яка відбулась в академії 24-26 квітня 2013 р., а також інші статті, присвячені розвитку теоретичних та експериментальних основ складу, структури, властивостей, руйнування, корозії, довговічності, технології будівельних матеріалів і виробів, відновленню експлуатаційних властивостей і захисту будівельних конструкцій, будівель і споруд транспортної інфраструктури.

Збірник призначено для інженерно-технічних працівників, магістрантів, студентів, науковців залізничного транспорту та промисловості.

З електронною версією збірника можна ознайомитися на сайті: <http://www.nbu.gov.ua/portal/natural/Znpudazt/index.html>.

Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus (Польща).

ISSN 1994-7852

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 8617 видано 06.04.2004 р. Друкується за рішенням вченої ради академії, протокол № 4 від 29 травня 2012 р.

Збірник включено до переліку №1 наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (Постанова президії ВАК України № 1-05/4 від 26 травня 2010 р.).

РЕДАКЦІЙНО-ВИДАВНИЧА РАДА

Члени Ради:

д.т.н., професор М.І.Данько	– голова Ради	д.т.н., професор С.В.Лістровий
д.т.н., професор Д.В.Ломотько	– заступник голови	д.т.н., професор В.І.Мойсеєнко
к.т.н., професор А.О.Каграманян	– заступник голови	д.т.н., професор С.І.Приходько
завідувач НДЧ С.В.Михалків	– заступник голови	д.е.н., професор Л.О.Позднякова
д.т.н., професор А.Б.Бойнік		д.т.н., професор А.А.Плугін
д.т.н., професор Т.В.Буцько		д.т.н., професор Ю.В.Соболев
д.е.н., професор В.Л.Дикань		д.т.н., професор Е.Д.Тартаковський
д.т.н., професор С.А.Єрощенко		д.т.н., професор Л.А.Тимофеева
д.т.н., професор А.М.Котенко		д.т.н., професор А.П.Фалендиш
		д.т.н., професор Я.В.Щербак

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Будівельні матеріали та конструкції

д.т.н., професор А.А.Плугін – головний редактор
д.х.н., професор А.М.Плугін
д.т.н., професор М.Ю.Ізбаш
д.т.н., професор В.С.Софронов
д.т.н., професор Г.М.Шабанова
к.т.н., професор В.П.Шраменко
к.т.н., доцент Г.Л.Ватуля

**За загальною редакцією доктора техн. наук, професора А.А. Плугіна
та канд. техн. наук, доцента Г.Л. Ватулі**

ISSN 1994-7852

Зареєстровано 2 червня 2007 р.

у ISSN International Centre 20. Rue
Bachaumont, 75002 PAPIS, FRANCE

©Українська державна академія
залізничного транспорту, 2013

ЗМІСТ

**Обрані праці 4-ї Міжнародної науково-технічної конференції
з будівельних матеріалів, конструкцій та споруд
«Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд
і будівель на залізничному транспорті», 24-26 квітня 2013 р.**

<i>Плугін А.А., Плугін А.М., Кагановський О.С., Градобоев О.В.</i> Колоїдна хімія та фізико-хімічна механіка як основа виробництва ресурсозберігаючих мінеральних в'язучих речовин та високоєфективних композиційних матеріалів на їх основі	7
<i>Пушкарьова К.К.</i> Ресурсозберігаючі мінеральні в'язучі речовини і високоєфективні композиційні матеріали на основі паливних зол і шлаків	19
<i>Шабанова Г.М., Корогодська А.М., Рищенко Т.Д., Ворожбіян Р.М.</i> Високоєфективні спеціальні в'язучі матеріали на основі лужноземельних оксидів	27
<i>Дворкин Л.И., Дворкин О.Л.</i> Многопараметрическое проектирование составов бетона	32
<i>Зайченко Н.М.</i> Комплексная модификация микроструктуры композиционных материалов на основе минеральных вяжущих веществ: Электростерическая стабилизация минеральных дисперсий	40
<i>Кагановский А.С., Градобоев О.В., Плугин Ал.А.</i> Высокоэффективные композиционные материалы на основе минеральных и синтетических волокон: Проблемы производства хризотил-цемента	50
<i>Перестюк В., Шуба Т., Чистяк В., Плугин А.А.</i> Огляд конструктивних особливостей та умов експлуатації залізобетонних конструкцій підрейкових основ залізниць	56
<i>Юрченко В.В., Тимофеева Л.А., Плугін А.А.</i> Методика експеримен- тальних досліджень з розроблення складу і технології композиційного матеріалу із термопластичних полімерів і відходів деревини	65
<i>Плугин А.А., Арутюнов В.А., Костюк Т.А.</i> Гидроизоляционные составы на основе портландцемента, армированные полимерными волокнами: оценка возможности применения полиэфирной микрофибры	70
<i>Рязанов А.Н., Винниченко В.И., Плугин А.А.</i> Теоретическое обоснование комплексного использования доломита и угольных отходов для получения строительных материалов	77

<i>Трикоз Л.В., Герасименко О.С., Козеняшев И.А.</i> Теоретические предпосылки создания грунтодержавших материалов	85
<i>Плугін Д.А.</i> Захист конструкцій пасажирських платформ від електрокорозії під дією струму витoku з рейкової колії	90
<i>Дудин А.А.</i> Механизм влияния электрического поля отрицательно заряженной поверхности частиц гидросиликатного геля на коэффициент диффузии катионов Ca^{2+}	95
<i>Плугин А.Н., Плугин А.А., Плугин Ал.А., Конев А.А., Забияка А.А.</i> Внутренние напряжения в бетоне, обусловленные электрическими воздействиями на него: экспериментальные исследования	102
<i>Афанасьев А.В.</i> Исследование механизма смачивания поверхности стали по краевому углу смачивания	119
<i>Будівельні матеріали, конструкції та споруди</i>	
<i>Плугин А.Н., Плугин А.А., Гасан Ю.Г., Червенко Е.Н.</i> Структура и прочность гипсового камня: развитие представлений о структуре	125
<i>Баранова А.А.</i> Исследование перераспределения температуры в частицах обожженного гипса	136
<i>Дворкін Л.Й., Мироненко А.В., Степасюк Ю.О.</i> Способи підвищення міцності низькоклінкерного шлакопортландцементу	141
<i>Шабанова Г.М., Тараненкова В.В., Гапонова О.О.</i> Високоєфективні магnezіальні в'язучі матеріали на основі вітчизняної сировини	148
<i>Ефремов А.Н.</i> Алюмосиликатные вяжущие на основе алюмината натрия	154
<i>Ворожбіян М.І., Шабанова Г.М., Кисельова С.О.</i> Дослідження особливостей впливу кремнеземвмісного шламу на процеси фазоутворення в системі $CaO - SiO_2 - H_2O$	164
<i>Дворкін Л.Й., Гарніцький Ю.В., Марчук В.В., Фірсов І.В.</i> Оптимізація режимів тепловологісної обробки бетонів на основі золівмісних цементів низької водопотреби	171
<i>Корогодская А.Н., Шабанова Г.Н.</i> Огнеупорный бетон на основе алюмобариевого хромсодержащего цемента	177
<i>Киценко Т.П.</i> Исследование линейных температурных деформаций алюмосиликатных и кремнеземистых огнеупорных бетонов на основе жидкого стекла	183

<i>Нестеренко С.Г.</i> Розроблення полімерцементного розчину оптимального складу	188
<i>Мироненко В.П., Подтележникова И.В., Герасименко О.С.</i> Оптимизация объемно-планировочных решений пассажирского здания вокзала	192
<i>Кондусова Н.В.</i> Вопросы инструментального обеспечения нарезания двухпараметрических зубчатых колес	199
<i>Омарова Б.А.</i> Оценка промерзания земляного полотна железных дорог в регионах Казахстана	210

Будівельна механіка і гідравліка

<i>Фалендиш А.П., Беліков Е.А.</i> Визначення раціональних характеристик сталобетонної балки прямокутного перерізу	217
<i>Мартинов І.Е., Павлюченков М.В.</i> Оптимізація опорного пристрою вагона-цистерни	221
<i>Даренський О.М.</i> Експериментальне визначення параметрів жорсткості проміжних скріплень типу ДО в умовах промислового транспорту	226
<i>Ватуля Г.Л., Галагура Е.И., Петренко Д.Г.</i> Определение механических характеристик конструкций с помощью глубинных датчиков	231
<i>Китов Ю.П., Веревичева М.А.</i> Оптимизация статически неопределимых балок переменного сечения	236
<i>Лобяк А.В., Сердюк В.В.</i> Уточненная методика моделирования пролетных строений мостов при усилении накладной железобетонной плитой	244
<i>Глазунов Ю.В.</i> Міцність бетону при зовнішньому армуванні конструкцій	251
<i>Берестянська С.Ю., Берестянська А.О.</i> Аналіз досліджень роботи сталобетонних плит при силових впливах	262
<i>Опанасенко О.В.</i> Використання діаграм граничних станів для визначення несучої здатності сталобетонних елементів	268
<i>Игнатенко Е.В.</i> Экспериментальные исследования сталобетонных колонн	272

<i>Борщов В.А., Богданова Т.Є., Гришина І.М., Ніколенко А.М.</i> Міри дії сили в механіці	277
<i>Борщев В.А., Егорова И.М., Гришина И.Н., Николенко А.Н.</i> Алгоритм и программа численного восстановления парной регрессии произвольного общего вида	280
<i>Нестеров А.П., Удовикова С.В.</i> Повышение производительности елеватора с ковшами с подвижными днищами полукруглой формы	287

**Обрані праці 4-ї Міжнародної науково-технічної конференції
з будівельних матеріалів, конструкцій та споруд
«ПРОБЛЕМИ НАДІЙНОСТІ ТА ДОВГОВІЧНОСТІ ІНЖЕНЕРНИХ
СПОРУД І БУДІВЕЛЬ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ»,
24-26 квітня 2013 р.**

УДК 691

*Д-р техн. наук А.А. Плуґін,
д-р хім. наук А.М. Плуґін (УкрДАЗТ),
канд. хім. наук О.С. Кагановський
(ТОВ «Капітал Менеджмент», м. Харків),
інж. О.В. Градобоев (ТОВ «БШК»,
Харківська обл.)*

*A.A. Plugin, A.N.Plugin,
A.S.Kaganovsky, O.V.Gradoboev*

**КОЛОЇДНА ХІМІЯ ТА ФІЗИКО-ХІМІЧНА МЕХАНІКА ЯК ОСНОВА
ВИРОБНИЦТВА РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧИХ МІНЕРАЛЬНИХ
В'ЯЖУЧИХ РЕЧОВИН ТА ВИСОКОЕФЕКТИВНИХ
КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ЇХ ОСНОВІ**

**COLLOIDAL CHEMISTRY AND PHYSICAL AND CHEMICAL
MECHANICS AS THE BASIS FOR THE PRODUCTION OF RESOURCE
MINERAL BINDERS AND HIGH-PERFORMANCE COMPOSITE
MATERIALS BASED ON THEM**

Постановка проблеми. Портландцемент і композиційні матеріали на його основі – бетон, залізобетон з кінця XIX – початку XX ст. до теперішнього часу є основними конструкційними матеріалами. Не очікуються радикальні зміни і у найближчому майбутньому. Більш того, у наш час властивості портландцементу і бетону удосконалюються, це удосконалення прискорюється, з'являються нові види бетону – самоущільнюючий, високофункціональний, реакційно-порошковий, галузі його застосування продовжують розширюватися. Так, несучі конструкції всіх хмарочосів 1920–70-х рр.,

у т.ч. знаменитих Chrysler Building, Empire State Building, World Trade Center, Sears Tower – виключно металеві, тоді як рекордні хмарочоси Азії 1990–2010 рр., такі як Петронас, Бурдж-Халіфа, зведені вже із залізобетону.

Виходячи з викладеного, можна стверджувати, що технологія бетону на сьогодні переживає науково-технічну революцію завдяки інтенсивному розвитку науки про бетон і подібні йому композиційні матеріали – бетонознавства. Бетонознавство є міждисциплінарною галуззю знань, що вивчає процеси твердіння і руйнування в'язучих матеріалів

і бетону з позицій фундаментальних наук. Деякі із видатних вчених у галузі бетонознавства навіть у назвах своїх праць, що вже стали класичними, підкреслювали їх ґрунтування на фундаментальних науках – фізиці [1], хімії [2–6], фізичній хімії в цілому [7–10] або її розділах, в основному термодинаміці [11–12], математиці [13–16] і навіть геології [17].

Проте такий важливий і дуже плідний розділ фізичної хімії, як колоїдна хімія, за думкою авторів, у бетонознавстві дотепер застосовувався недостатньо ефективно і лише останніми роками з'явилися праці, де системно викладена колоїдна хімія для цементів, бетонів і конструкцій із них [18–22].

Мета роботи – викладення у концентрованому вигляді найбільш важливих положень колоїдної хімії та фізико-хімічної механіки цементів, бетонів і конструкцій із них.

Історичний нарис розвитку колоїдної хімії та фізико-хімічної механіки, у т.ч. цементів, бетонів і конструкцій із них. Термін «Колоїдна хімія» походить від давньогрецького κόλλα – клей [23]. В англійських країнах замість цієї назви застосовують Interface and colloid science – дослівно «Поверхнева та колоїдна наука», або «Фізична хімія дисперсних систем і поверхневих явищ». Її прикладне значення у [23] характеризується так: «Розробляє технології будівельних матеріалів, буріння гірських порід, золь-гель технології. Відіграє фундаментальну роль у нанотехнологіях».

Колоїдна хімія формувалась у XVIII–XIX ст. у результаті накопичення знань про дисперсні системи і матеріали:

1745–55 рр. – Михайло Васильович Ломоносов (Росія) досліджує і застосовує дисперсію металів у склі;

1777 р. – Карл Вільгельм Шеєле (Швеція) відкриває явище адсорбції газів вугіллям;

1785 р. – Товій Єгорович Ловіц (Росія) відкриває явище адсорбції із розчинів;

1806 р. – П'єр-Сімон Лаплас (Франція) пояснює всмоктування води

пористими матеріалами та її підняття ними капілярним тиском;

1808 р. – Федір Федорович Рейсс (Росія) відкриває явища електроосмосу та електрофорезу;

1845 р. – Франческо Сельмі (Італія) встановлює різницю між колоїдними та істинними розчинами;

1853 р. – Герман фон Гельмгольц (Німеччина) надає опис подвійного електричного шару ПЕШ;

1857 р. – Майкл Фарадей (Велика Британія) – створює дисперсії металів у рідкій фазі.

Остаточне формування колоїдної хімії в окрему наукову дисципліну пов'язують з ім'ям Томаса Грема (рис. 1), який у 1860-ті рр. проводить системні дослідження колоїдів, уводить в обіг терміни «колоїд», «золь», «гель», відкриває явище діалізу.

Подальший розвиток колоїдної хімії відбувався так:

1878 р. – Джозая Віллард Гіббс (США) розробив термодинаміку поверхневих явищ;

1905 р. – Альберт Ейнштейн (Німеччина) – надав математичний опис броунівського руху;

1917 р. – Ірвінг Ленгмюр (США) розробив кінетичну теорію адсорбції;

1928 р. – Петро Олександрович Ребіндер (СРСР) відкрив явище адсорбційного зниження міцності;

1938 р. – Борис Володимирович Дерягін і Лев Давидович Ландау (СРСР) і приблизно у той же час незалежно від них Фервей і Овербек (E.J.W.Verwey, J.Th.G.Overbeek, Нідерланди) розробили теорію стійкості колоїдів ДЛФО;

1940-50-ті рр. – Петро Олександрович Ребіндер (СРСР) досліджує структуроутворення дисперсій, створює новий розділ колоїдної хімії – фізико-хімічну механіку дисперсних систем.

Колоїдна хімія та фізико-хімічна механіка в бетонознавстві, хоча й описово, використовувались з другої половини XIX ст.

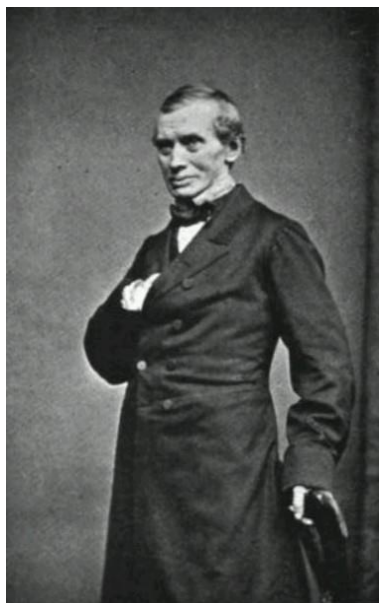


Рис. 1. Томас Грем
(Thomas Graham, 1805-69 pp.,
Велика Британія)

У 1867 р. Вільгельм Михаеліс (Michaelis, Німеччина) пропонує колоїдно-хімічну теорію твердіння портландцементу, згідно з якою послідовність твердіння така: твердофазова реакція гідратації мінералів цементу (топохімічний механізм гідратації) – колоїдація гідратованих мінералів цементу – склеювання колоїдних часток у цементний гель.

1883 р. – Анрі Луї Ле-Шательє (Le Chatelier, Франція) пропонує кристало-хімічну теорію твердіння портландцементу, згідно з якою послідовність твердіння така:

розчинення мінералів цементу – утворення пересиченого відносно продуктів гідратації водного розчину – кристалізація із пересиченого розчину продуктів гідратації (крізьрозчинний механізм гідратації) – механічне переплетення кристалів, яке забезпечує міцність цементного каменю і бетону. Очевидно, Ле-Шательє доступним йому методом світової мікроскопії спостерігав дещо подібне рис. 2, на якому проглядається послідовне зростання і переплетення кристалів продуктів гідратації в'язучої речовини.

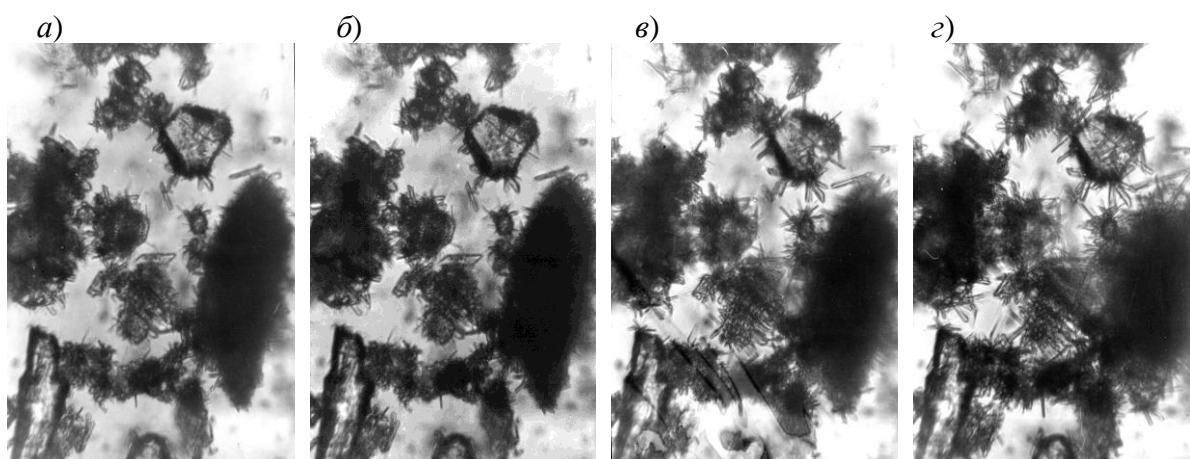


Рис. 2. Мікрофотознімки суміші півгідрату сульфату кальцію і меленого доменного гранульованого шлаку через 5 (а), 10 (б), 15 (в) і 20 хвилин (г) після замішування водою. Знімки отримані А.А. Плуїніним та О.Г. Ольгінським у 1993 р. за допомогою мікроскопа МБИ-6 ЛОМО

1923 р. – Олександр Олександрович Байков (СРСР) пропонує теорію твердіння портландцементу, згідно з якою послідовність твердіння така: твердофазова реакція гідратації мінералів цементу (топохімічний механізм гідратації) – утворення цементного гелю – перекристалізація гелю з утворенням цементного каменю, що містить гідросилікатний гель і кристалогідрати.

1954 р. – П.О. Ребіндер (рис. 3) розробляє теорію, яку іноді називають теорією гідратаційного структуроутворення



і згідно з якою послідовність процесу твердіння така: розчинення мінералів цементу – утворення пересиченого відносно продуктів гідратації водного розчину – утворення із пересиченого розчину гелевих і кристалічних продуктів гідратації (крізьрозчинний механізм гідратації, рис. 4) – структуроутворення: утворення коагуляційної структури з коагуляційними контактами – її перехід до конденсаційно-кристалізаційної структури з фазовими контактами (рис. 5).

Рис. 3. П.О. Ребіндер (ліворуч) з О.П. Мчедловим-Петросьяном – засновником кафедри будівельних матеріалів ХІТ. 1950-ті рр.

Проте у найбільш досконалій і всевітньо визнаній теорії Ребіндера залишилися недоліки і протиріччя: вона залишилася описовою; імовірність утворення суцільного кристалізаційного каркасу в бетонній конструкції вкрай малоімовірна через неможливість зростання кристалів різних мінералів (із чотирьох клінкерних мінералів утворюються десятки продуктів гідратації різної стехіометрії та кристалічної структури) і зростання однакових, проте несприятливо орієнтованих один до одного кристалів.

1989 р. – А.М. Плугін розробляє електрогетерогенну теорію твердіння портландцементу [19], яка є розвитком теорії Ребіндера з урахуванням електрогетерогенних взаємодій між дисперсними частками та повністю ґрунтується на кількісних закономірностях колоїдної хімії та фізико-хімічної механіки дисперсних систем. У розвинутому в рамках наукової школи А.М. Плузіна вигляді вона викладена у [20–22] (рис. 6).

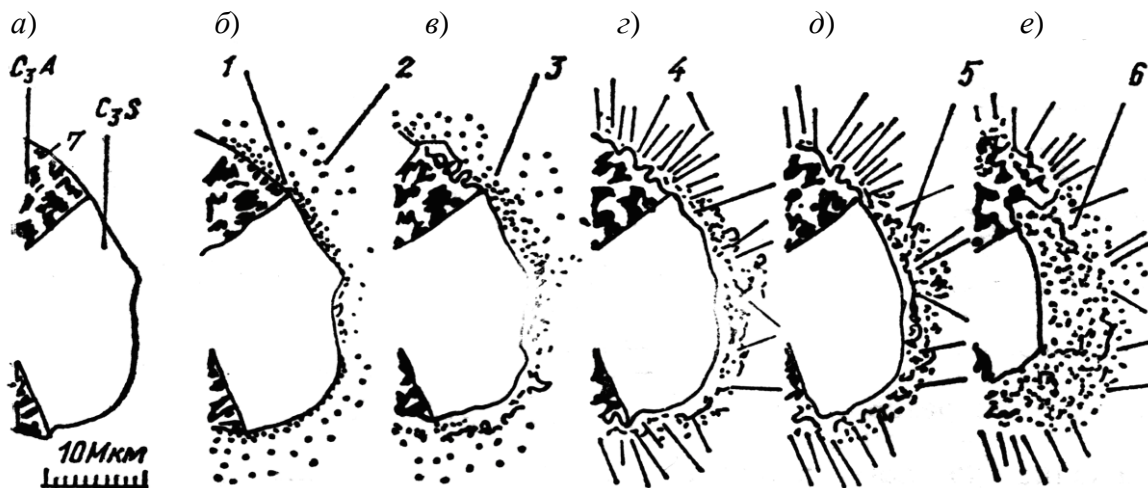


Рис. 4. Схема гідратації за [5; 6] – розчинення частки цементу і утворення гелевих (у вигляді крапок) і кристалічних (у т.ч. у вигляді голок) продуктів гідратації. Послідовно від *a* до *e* розмір частки цементу зменшується, а кількість часток продуктів гідратації – збільшується

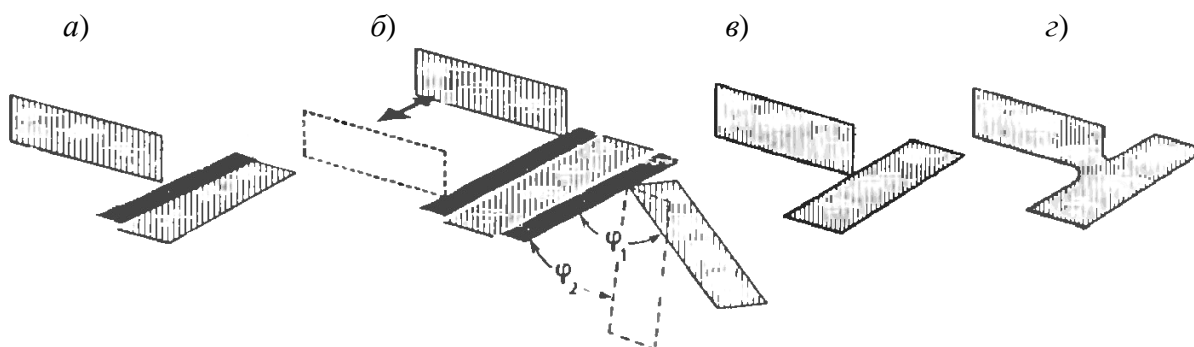


Рис. 5. Схема контактів [4]: *a*, *б* – коагуляційних через тонкі водні прошарки, які дозволяють часткам переміщуватись або обертатись одна відносно одної (*б*); *в* – точкових з локальними хімічними зв'язками між частками; *г* – фазових зі зростанням кристалічної решітки часток

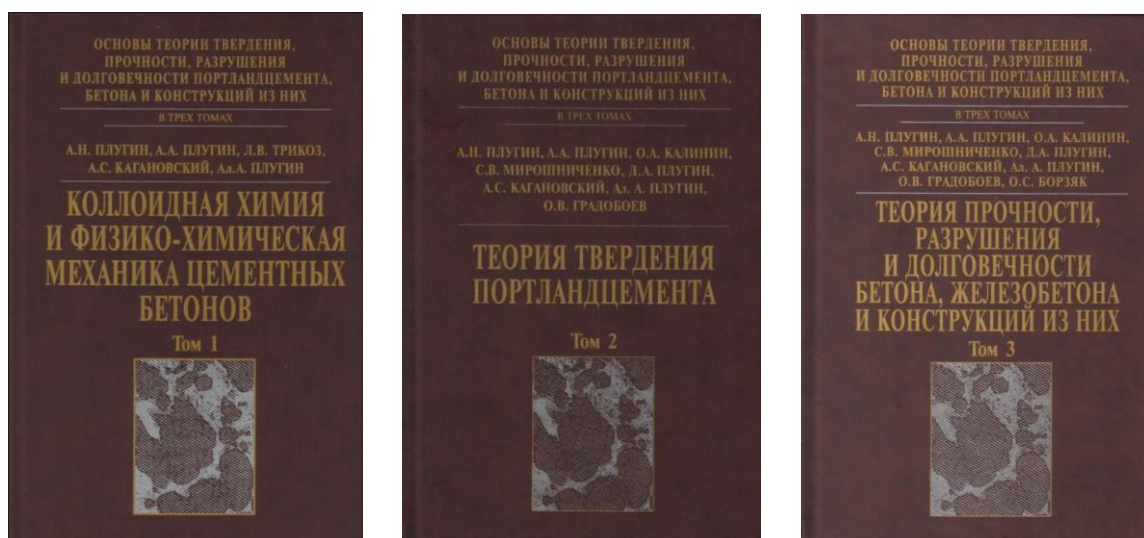


Рис. 6. Тритомна монографія, в якій викладені основні положення колоїдно-хімічного бетонознавства [20–22]

Основні положення колоїдної хімії та фізико-хімічної механіки в'язучих, бетонів і конструкцій із них [20–22]

1. Тверднучі й затверділі неорганічні в'язучі і бетони є полідисперсними матеріалами, а продукти гідратації в'язучих – водно-дисперсними системами з дисперсною фазою – частками продуктів гідратації, дисперсійним середовищем – розчином електроліту.

2. Частки неорганічної дисперсної фази у водно-дисперсних системах мають поверхневий заряд і електроповерхневий потенціал.

3. Між різнойменно зарядженими частками дисперсної фази у тверднучих неорганічних в'язучих і композиційних матеріалах на їх основі виникають електрогетерогенні контакти, які визначають їх міцність (колоїдно-хімічна теорія міцності бетону).

4. Поверхневий заряд та електроповерхневий потенціал дисперсної фази впливають на процес фільтрації в капілярно-пористих матеріалах (безнапірна водопроникність бетону).

5. Поверхневий заряд й електроповерхневий потенціал дисперсної фази впливають на процес дифузії в капілярно-пористих матеріалах, зокрема, на проникнення агресивних речовин у бетон і винесення із нього продуктів корозії. Дифузія визначає швидкість корозії і термін служби бетонних і залізобетонних конструкцій.

6. Характер полідисперсної структури бетону визначає фізичні та фізико-механічні властивості бетону, особливо його безнапірну водопроникність і понаднормативну довготривалу повзучість.

7. Понаднормативна довготривала повзучість цементного бетону визначає понаднормативні деформації довгомірних і тонкостінних залізобетонних конструкцій із них.

З цих положень 1–3 можна вважати основоположними, первинними, інші –

похідними від них. Розглянемо основоположні первинні положення колоїдної хімії та фізико-хімічної механіки в'язучих, бетонів і конструкцій із них.

Тверднучі й затверділі неорганічні в'язучі і бетони – полідисперсні матеріали, продукти гідратації в'язучих – водно-дисперсні системи

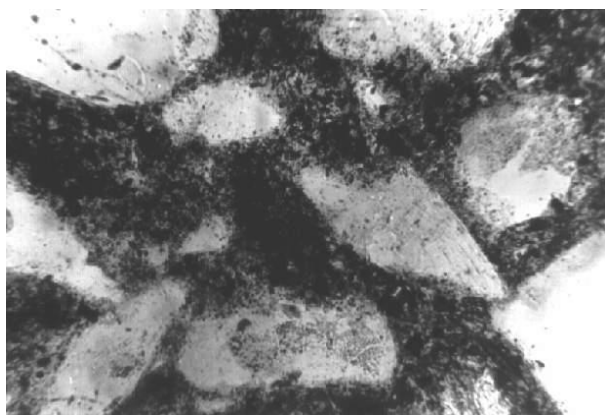
На рис. 7 наведені мікроскопічні та електронно-мікроскопічні знімки, які підтверджують, що бетон і цементний камінь є полідисперсними матеріалами (розмір часток гідросилікатів кальцію – десятки нанометрів, зерен крупного заповнювача – десятки міліметрів).

Це надає можливість розглядати структуру бетону як багаторівневу (рис. 8). Таке уявлення структури бетону дозволило для ефективного керування його структурою та властивостями при призначенні складу застосовувати структурні характеристики кожного рівня – коефіцієнти розсунення зерен крупного та дрібного заповнювача α і μ , водоцементне відношення В/Ц та співвідношення між кількістю гелевих та кристалічних продуктів гідратації Г/К, забезпечуючи їх певні оптимальні значення.

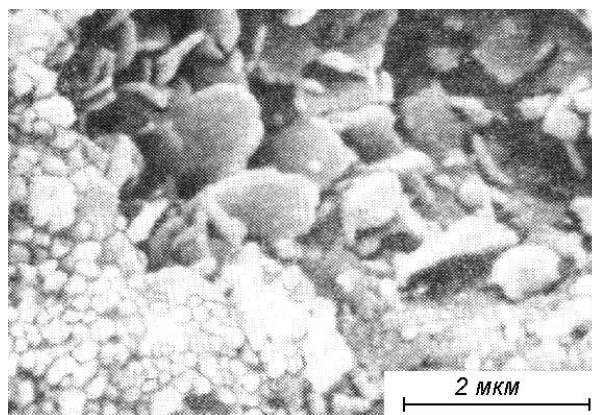
Із рис. 7, б–д видно, що продукти гідратації цементу є водно-дисперсною системою з дисперсною фазою – частками продуктів гідратації, дисперсійним середовищем – розчином електроліту (насиченим розчином $Ca(OH)_2$, причому гідросилікатний гель (рис. 7, д) відповідає колоїдному ступеню дисперсності, що в значній мірі визначає властивості цементного каменю і бетону.

Поверхневий заряд та електроповерхневий потенціал часток неорганічної дисперсної фази у водно-дисперсних системах обумовлені наявністю подвійного електричного шару ПЕШ на границі розподілу фаз (рис. 9).

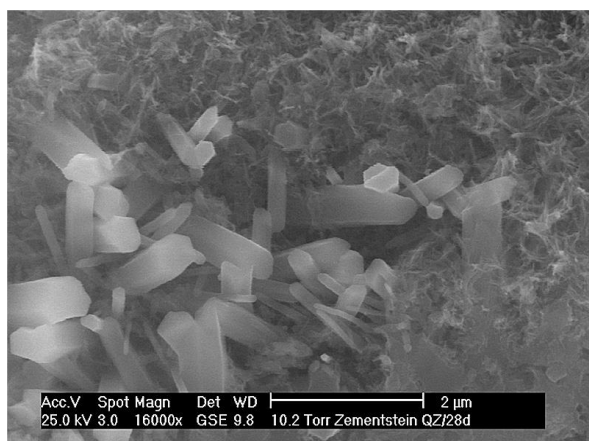
a)



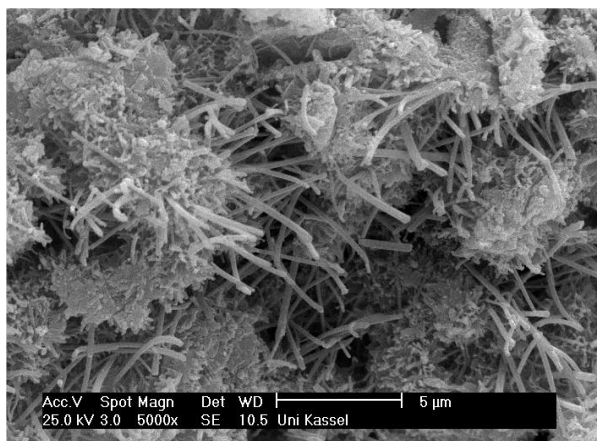
б)



в)



г)



д)

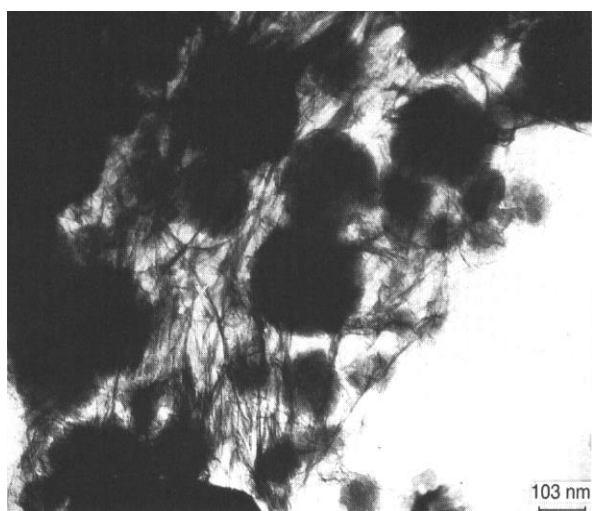


Рис. 7. Мікрофотознімки бетону, цементного каменю і продуктів гідратації цементу:
a – прозорий шліф, світловий мікроскоп (А.А. Пługін, О.О. Ольгінський);
б – вугільна репліка, просвічувальний електронний мікроскоп (В. Лах, Я. Буреш);
в–д – відкол цементного каменю, скануючий електронний мікроскоп (*в* – І. Харченко, А. Панченко, J. Stark, Н.-В. Fischer; *г* – R. Krelaus, M. Schmidt, M. Gehrke, B. Middendorf; *д* – R. Trettin, S. Wild)

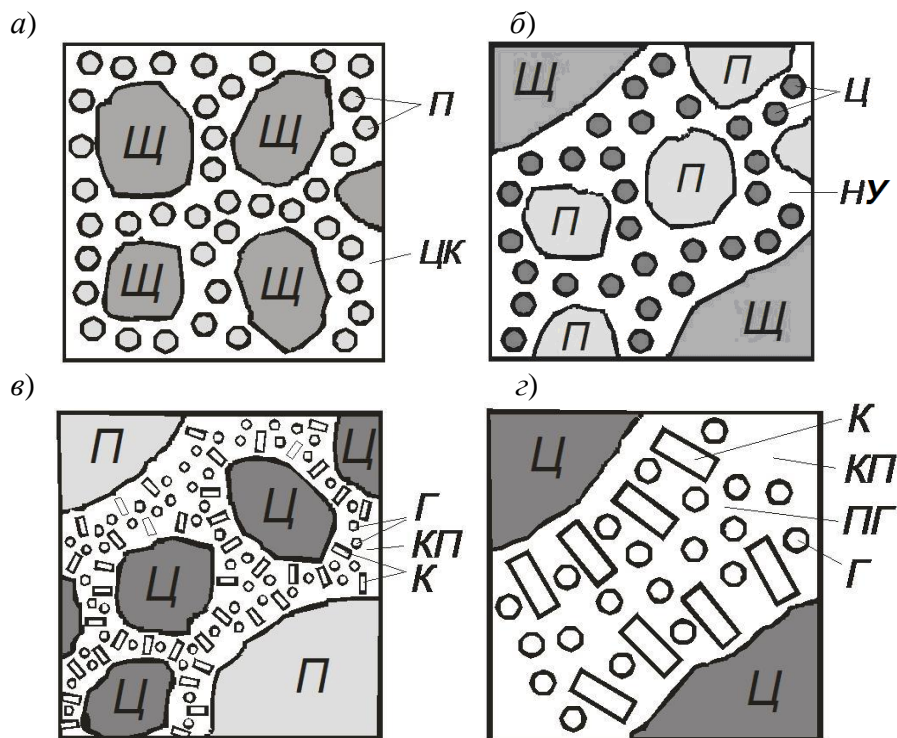


Рис. 8. Схема багаторівневої структури бетону: *a* – макроструктура; *б* – мезоструктура; *в* – мікроструктура; *г* – субмікроструктура; Щ – зерна крупного заповнювача (щебеню); П – зерна дрібного заповнювача (піску); ЦК – цементний камінь (тісто); Ц – частки цементу; НУ – гідратні новоутворення (продукти гідратації); К – кристалогідрати; Г – частки гідросилікатного гелю; КП – капілярні пори; ПГ – пори гелю

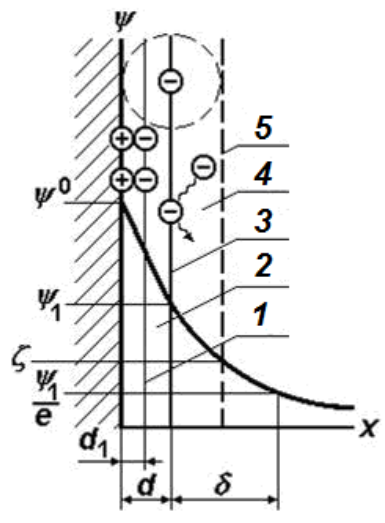


Рис. 9. Схема будови подвійного електричного шару на границі розподілу «неорганічна тверда дисперсна фаза – рідке дисперсійне середовище (водний розчин)» і розподілу потенціалу в ньому:

ψ^0 – електроповерхневий потенціал; ψ_1 – потенціал на границі щільної і дифузної частин ПЕШ; ζ – електрокінетичний потенціал; δ – товщина дифузної частини ПЕШ; 1 – внутрішня плоскість Гельмгольца; 2 – щільна частина ПЕШ; 3 – зовнішня плоскість Гельмгольца; 4 – дифузна частина ПЕШ; 5 – плоскість ковзання

Основними рівняннями, що визначають електроповерхневий потенціал часток неорганічної дисперсної фази у

водно-дисперсних системах, є запропоновані у [17] і удосконалені у [18]:

$$\psi^0 = E^0 + \Delta\psi^0; \quad (1)$$

$$\psi_{XYZ}^0 = -\frac{x\psi_X^0 + y\psi_Y^0 + z\psi_Z^0}{x+y+z}; \quad (2)$$

$$\psi_p^0 = \psi^0 - 0,059pH, \quad (3)$$

де ψ^0 – абсолютний електроповерхневий потенціал простої речовини, В; E^0 – стандартний електродний потенціал простої речовини, В; $\Delta\psi^0$ – поправка, що враховує перехід від стандартного електродного до електроповерхневого потенціалу, В; ψ_{XYZ}^0 – абсолютний електроповерхневий потенціал складної речовини $X_xY_yZ_z$, де x, y, z – стехіометричні коефіцієнти простих речовин X, Y, Z ; ψ_X^0 ,

ψ_Y^0, ψ_Z^0 – абсолютні електроповерхневі потенціали простих речовин X, Y, Z ; ψ_p^0 – рівноважний електроповерхневий потенціал простої або складної речовини (близький до ψ_1 на рис. 9), В.

Абсолютні та рівноважні електроповерхневі потенціали структурних складових портландцементу, цементного каменю і бетону наведені в таблиці.

Таблиця

Електроповерхневі потенціали структурних складових бетону

№	Найменування	Потенціал, В	
		ψ^0	$\psi_p^0, pH=12$
1	Кварц SiO_2	-0,55	-1,26
2	Граніт $0,3SiO_2 \times 0,7K_2O \times Al_2O_3 \times 6SiO_2$	-0,07	-0,78
3	Кальцит $CaCO_3$	+1,26	+0,55
4	Аліт C_3S	+0,74	-0,03
5	Беліт C_2S	+0,55	-0,16
6	Трикальцієвий алюмінат C_3A	+0,90	+0,20
7	Високоосновні гідросилікати кальцію C_2SH	+0,59	-0,11
8	Низькоосновні гідросилікати кальцію CSH	+0,29	-0,37
9	Портландит $Ca(OH)_2$	+1,24	+0,53
10	Гідроалюмінат кальцію C_3AH_6	+0,92	+0,21
11	Еtringіт $C_3A \times 3CaSO_4 \times H_{32}$	+0,90	+0,19
12	Гідросульфалюмінат кальцію $C_3A \times CaSO_4 \times H_{19}$	+1,24	+0,53

Електрогетерогенні й електрогомгенні контакти між частками дисперсної фази у твердних неорганічних в'язучих і композиційних матеріалах на їх основі. Колоїдно-хімічна теорія міцності бетону

Із рис. 4 і 7 видно, що в структурі продуктів гідратації, спочатку

коагуляційній, потім конденсаційно-кристалізаційній, наявні як частки кристалогідратів – портландиту, гідросульфалюмінатів та гідроалюмінатів кальцію, що мають позитивний поверхневий заряд, так і частки гідросилікатного гелю, що мають негативний поверхневий заряд (табл. 1, рис. 10). Між ними виникають

електрогетерогенні (між різнойменно зарядженими частками) й електрогомогенні (між однойменно зарядженими частками) контакти (рис. 10, 11). Аналогічні контакти виникають між частками продуктів гідратації і частками цементу, зернами заповнювачів. З цих контактів саме електрогетерогенні мають високі міцність та водостійкість, оскільки в них і

молекулярна, і електростатична складова взаємодії є притягувальною, відсутні сили, що перешкоджають притягання, крім останнього мономолекулярного шару води, і саме вони на відміну від досить локальних кристалізаційних контактів здатні забезпечити просторову міцну структуру продуктів гідратації по всій конструкції із бетону і, відповідно, міцність бетону.

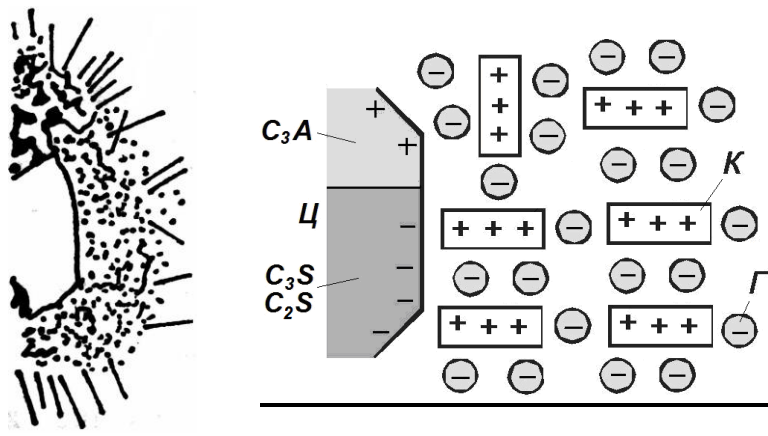


Рис. 10. Схема електрогетерогенних контактів у цементному камені і продуктах гідратації (позначення, як на рис. 8)

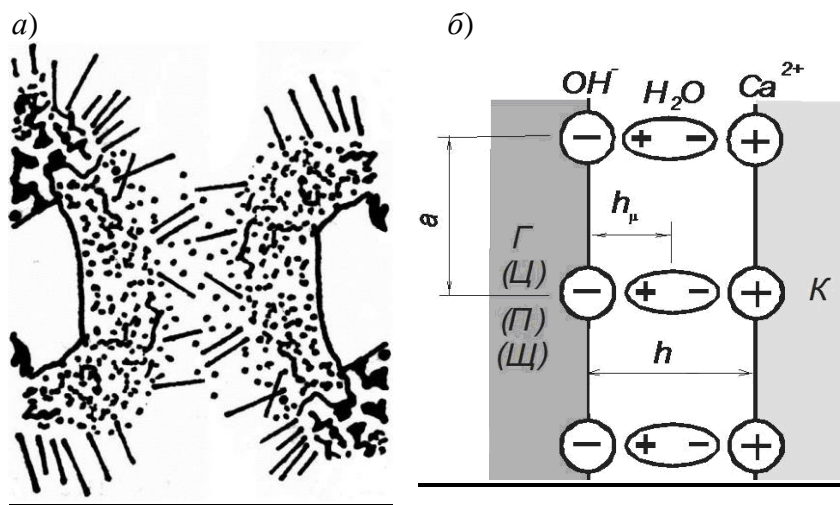


Рис. 11. Схема електрогетерогенних контактів між частками продуктів гідратації, цементу, заповнювачів: *a* – загальна схема контакту між частками цементу через продукти гідратації; *б* – електрогетерогенний контакт через мономолекулярний водний прошарок; *в* – безпосередній (без водного прошарку) електрогетерогенний контакт (позначення, як на рис. 8)

На такій моделі структури ґрунтується колоїдно-хімічна теорія міцності цементного каменю і бетону. Одиначним

елементом міцності є контакт між протилежними потенціалвизначальними іонами кристалогідрату і частинками гелю

(або частинками цементу, зернами заповнювача), що здійснюється через дипольну молекулу води (рис. 11, б). Сила взаємодії в такому контакті визначається відомим законом Кулона та рівнянням взаємодії між зарядом і дипольним моментом, що з нього випливає.

Згідно з теорією міцності дисперсних систем Ребіндера-Щукіна [24] міцність цементного каменю при розтягу $R_t^{мк}$, Па, може бути визначена як добуток міцності електрогетерогенного контакту між поверхнями дисперсних часток $R_t^{ек}$, Па, і поверхневої частки електрогетерогенних контактів у перерізі цементного каменю $\gamma_s^{ек}$:

$$R_t^{мк} = R_t^{ек} \cdot \gamma_s^{ек}. \quad (4)$$

Поверхнева частка електрогетерогенних контактів у перерізі цементного каменю $\gamma_s^{ек}$ залежить від його пористості, отже, водоцементного відношення, ступеня гідратації і т.д. і в найкращому випадку може наближатись до 1.

Міцність електрогетерогенного контакту між поверхнями дисперсних часток $R_t^{ек}$ є добутком сили взаємодії між потенціалвизначальними іонами в одиничному електрогетерогенному контакті $P_{ек}$, Н і поверхневої концентрації потенціалвизначальних іонів на дисперсній частці (кристалогідраті) n^0 , $1/м^2$:

$$R_t^{ек} = P_{ек} \cdot n^0 = [Н \cdot 1/м^2 = Па]. \quad (5)$$

Сила взаємодії між потенціалвизначальними іонами в одиничному електрогетерогенному контакті $P_{ек}$ згідно з

рис. 11, б складається із іон-іонної взаємодії (притягання) між потенціалвизначальними іонами та іон-дипольної взаємодії між потенціалвизначальним іоном дисперсної частки (кристалогідрату) і полярною молекулою води, через мономолекулярний шар якої взаємодіють частки.

Поверхнева концентрація потенціалвизначальних іонів на дисперсній частці n^0 визначається виходячи із будови ПЕШ (рис. 9):

$$n^0 = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_0 (\psi_p^0)^+}{4\pi d_1 z^+ e}, \quad (6)$$

де ε_1 – діелектрична проникність щільної частини ПЕШ; ε_0 – електрична стала; ψ_p^0 – рівноважний електроповерхневий потенціал; d_1 – товщина щільної частини ПЕШ (рис. 9); z^+ – валентність (заряд) потенціалвизначального іона кристалогідрату; e – елементарний заряд.

Висновки. Таким чином, у статті викладені основоположні первинні положення колоїдної хімії та фізико-хімічної механіки цементів, бетонів і конструкцій із них, які дозволяють ефективно керувати властивостями бетону і композиційних матеріалів на основі мінеральних в'язучих речовин. Наведені рівняння електроповерхневого потенціалу дисперсної фази, міцності електрогетерогенного контакту і цементного каменю.

Список літератури

1. Ахвердов, И.Н. Основы физики бетона [Текст] / И.Н. Ахвердов. – М.: Стройиздат, 1981. – 464 с.
2. Ли, Ф.М. Химия цемента и бетона [Текст]: пер.с англ. Б.С. Левмана; под ред. С.М. Рояка. – М.: Госстройиздат, 1961. – 646 с.
3. Химия цементов [Текст] / под ред. Х.ф.У.Тейлора; сокр. пер. с англ.; под ред. Ю.М. Бутта и С.А. Кржеминского. – М.: Стройиздат, 1969. – 502 с.

4. Ратинов, В.Б. Химия в строительстве [Текст] / В.Б. Ратинов, Ф.М. Иванов. – М.: Стройиздат, 1969. – 200 с.
5. Мчедлов-Петросян, О.П. Химия неорганических строительных материалов [Текст] / О.П. Мчедлов-Петросян. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1988. – 304 с.
6. Тейлор, Х. Химия цемента [Текст]: пер.с англ. А.И. Бойковой и Т.В. Кузнецовой. – М.: Мир, 1996. – 560 с.
7. Куколев, Г.В. Химия кремния и физическая химия силикатов [Текст] / Г.В. Куколев. – М.: Высш.шк., 1966. – 464 с.
8. Физическая химия силикатов [Текст] / А.А. Пащенко, Н.В. Алексенко, Е.А. Мясникова и др.; под ред. А.А. Пащенко. – К.: Вища школа, 1977. – 384 с.
9. Рамачандран, В. Наука о бетоне. Физико-химическое бетоноведение [Текст] / В. Рамачандран, Р. Фельдман, Дж. Бодуэн: пер. с англ. Т.И. Розенберг, Ю.Б. Ратиновой; под ред. В.Б. Ратинова. – М.: Стройиздат, 1986. – 278 с.
10. Кузнецова, Т.В. Физическая химия вяжущих материалов [Текст] / Т.В. Кузнецова, И.В. Кудряшов, В.В. Тимашев. – М.: Высш. шк., 1989. – 384 с.
11. Бабушкин, В.И. Термодинамика силикатов [Текст] / В.И. Бабушкин, Г.М. Матвеев, О.П. Мчедлов-Петросян; под ред. О.П. Мчедлова-Петросяна. – М.: Госстройиздат, 1962. – 268 с.
12. Бабушкин, В.И. Термодинамика силикатов [Текст] / В.И. Бабушкин, Г.М. Матвеев, О.П. Мчедлов-Петросян; под ред. О.П. Мчедлова-Петросяна. – 4-е изд., перераб.и доп. – М.: Стройиздат, 1986. – 408 с.
13. Баженов, Ю.М. Перспективы применения математических методов в технологии сборного железобетона [Текст] / Ю.М. Баженов, В.А. Вознесенский. – М.: Стройиздат, 1974. – 192 с.
14. Современные методы оптимизации композиционных материалов [Текст] / В.А. Вознесенский, В.Н. Выровой, В.Я. Керш, Т.В. Ляшенко и др.; под ред. В.А. Вознесенского. – К.: Будівельник, 1983. – 144 с.
15. ЭВМ и оптимизация свойств строительных материалов [Текст] / В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко, Я.П. Иванов, И.И. Николов; под ред. В.А. Вознесенского. – К.: Будівельник, 1989. – 240 с.
16. Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ [Текст] / В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко, Б.Л. Огарков; под ред. В.А. Вознесенского. – К.: Вища школа, 1989. – 328 с.
17. Лесовик, В.С. Геоника. Предмет и задачи [Текст] / В.С. Лесовик. – Белгород: БГТУ, 2012. – 213 с.
18. Плугин, А.Н. Электрогетерогенные взаимодействия при твердении цементных вяжущих [Текст]: дисс. ... д-ра хим. наук / А.Н. Плугин. – К.: ИКХХВ, 1989. – 282 с.
19. Плугин, А.А. Долговечность бетона и железобетона в обводненных сооружениях: Коллоидно-химические основы [Текст]: дисс. ... д-ра техн. наук / А.А. Плугин. – Харьков: УкрГАЗТ, 2005. – 442 с.
20. Плугин, А.Н. Основы теории твердения, прочности, разрушения и долговечности портландцемента, бетона и конструкций из них [Текст]: в 3-х т. Т.1. Коллоидная химия и физико-химическая механика цементных бетонов / А.Н. Плугин, А.А. Плугин, Л.В. Трикоз, А.С. Кагановский, Ал.А. Плугин; под ред. А.Н. Плугина. – К.: Наук. думка, 2011. – 331 с.
21. Плугин, А.Н. Основы теории твердения, прочности, разрушения и долговечности портландцемента, бетона и конструкций из них [Текст]: в 3-х т. Т.2. Теория твердения портландцемента / А.Н. Плугин, А.А. Плугин, О.А. Калинин, С.В. Мирошниченко, Д.А. Плугин, А.С. Кагановский, Ал.А. Плугин, О.В. Градобоев; под ред. А.Н. Плугина. – К.: Наук. думка, 2012. – 224 с.

22. Плугин, А.Н. Основы теории твердения, прочности, разрушения и долговечности портландцемента, бетона и конструкций из них [Текст]: в 3-х т. Т.3. Теория прочности, разрушения и долговечности бетона, железобетона и конструкций из них / А.Н. Плугин, А.А. Плугин, О.А. Калинин, С.В. Мирошниченко, Д.А. Плугин, А.С. Кагановский, Ал.А. Плугин, О.В. Градобоев, О.С. Борзяк; под ред. А.Н. Плугина. – К.: Наук. думка, 2012. – 288 с.

23. Википедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ru.wikipedia.org>.

24. Ребиндер, П.А. О механической прочности пористых дисперсных тел [Текст] / П.А. Ребиндер, Е.Д. Шукин, Л.Я. Марголис // ДАН СССР. – 1964. – Т. 154. – № 3. – С. 695-698.

Ключові слова: цемент, бетон, твердіння, міцність, колоїдна хімія

Анотації

Викладені основоположні первинні положення колоїдної хімії та фізико-хімічної механіки цементів, бетонів і конструкцій із них. Наведені рівняння електроповерхневого потенціалу дисперсної фази, міцності електрогетерогенного контакту і цементного каменю.

Изложены основополагающие первичные положения коллоидной химии и физико-химической механики цементов, бетонов и конструкций из них. Приведены уравнения электроповерхностного потенциала дисперсной фазы, прочности электрогетерогенного контакта и цементного камня.

Sets out the fundamental position of the primary colloid chemistry and physical and chemical mechanics of cement and construction of them. The equations of surface electrical potential of the dispersed phase and the strength of electroheterogeneous contact and cement stone.

УДК 666.946.3

Д-р техн. наук К.К. Пушкарьова (КНУБА)

К.К. Pushkarova

РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧІ МІНЕРАЛЬНІ В'ЯЖУЧІ РЕЧОВИНИ І ВИСОКОЕФЕКТИВНІ КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ НА ОСНОВІ ПАЛИВНИХ ЗОЛ І ШЛАКІВ

RESOURCE-SAVING MINERAL BINDERS AND HIGH-PERFORMANCE COMPOSITE MATERIALS ON THE BASIS OF FLY ASHES AND SINDER

Щорічно у світі утворюється 370 млн тонн золошлакових відходів, у тому числі в Україні – 10 млн тонн і ще у відвалах міститься – 50 млн т.

Вирішення екологічних та економічних проблем України, пов'язаних

з використанням відходів енергетики у будівництві, потребує розробки ефективних технологій переробки, що включають не тільки методи їх компактування та зв'язування різноманітними видами в'язучих речовин, але й активації інертної

складової відходів, щоб забезпечити максимальний ступінь їх утилізації та створити передумови для отримання якісних будівельних матеріалів [1, 2]. Вважається, що проблема активації золошлакових відходів направлена на вирішення задач щодо отримання високонаповнених золовмісних в'язучих систем та бетонів на їх основі [3].

Ефективні способи введення значної кількості золошлакових відходів до складу різних видів будівельних матеріалів, у тому числі бетонних сумішей, можуть бути реалізовані шляхом використання сучасних технологій отримання в'язучих низької водопотреби, тонкомелених цементів (ТМЦ) та інтенсивної технології окремого приготування складових бетонної суміші (ІРТ) [4]. Вибір технології утилізації зазначених відходів має здійснюватись з урахуванням економічного, екологічного і технічного факторів.

Кількість золошлакових відходів, що використовується у складі в'язучої речовини та бетонної суміші, може бути збільшена за рахунок її активації різними способами, в тому числі механічним, хімічним, термічним та комплексним (гідромеханічним, механохімічним, електромеханохімічним) [5,6]. Вибір способу активації залежить від хіміко-мінералогічного складу золи, способу її отримання, а також від складу в'язучої системи, до якої цю золу додають [7].

Активация золи сприяє практичному просуненню досить популярної концепції «HVFA», або «High Volume Fly Ash Concrete» («Висконаповнений бетон на основі золи-винесення») [8]. Ця концепція передбачає розширене впровадження цементів, у складі яких вміст золи перевищує 30...40 %, що відповідає ідеям Концепції сталого розвитку та Кіотському протоколу. Такий підхід дозволяє по-іншому оцінити роль золи у цементній системі, розглядаючи золу не як «допоміжний», а як «базовий» сировинний компонент.

Ідея активації золи активно досліджується протягом останніх 50 років. Аналіз робіт [9,10], які вже стали класичними, дозволяє виділити три основні види активації золи-винесення (або в'язучих речовин на її основі): механічну, хімічну і термічну.

Механічна активація полягає у підвищенні питомої поверхні вихідної золи шляхом її помелу. Це сприяє не тільки кількісному підвищенню реакційної здатності реагентів, але й має якісний ефект: формування нових активних поверхонь алюмосилікатної фази, що містять мікродефекти, які відрізняються високою поверхневою енергією і, відповідно, реакційною здатністю. У той же час підвищення питомої поверхні золи більше 700 м²/кг призводить до зниження міцності внаслідок збільшення водопотреби [11]. Відокремлення більш тонкої фракції золи (до 45 або 90 мкм) можливо не тільки завдяки помелу, але й шляхом сепарації. Такий підхід сприяє економії енергії на помел, але не дозволяє утилізувати всі 100 % золи.

Хімічна активація золи найчастіше пов'язана з розчиненням алюмосилікатного скла золи у лужному середовищі. Кислотна активація, яка іноді використовується у хімічній технології, широко не використовується в галузі будівельних матеріалів у зв'язку з високою вартістю як матеріалів, так і процесу, а також небезпечністю для персоналу та обладнання. На сьогодні існує декілька напрямків хімічної активації: **лужноземельна, сульфатна та лужна**. У першому випадку як активатор золи використовують портландцемент або вапно; фазовий склад новоутворень представлений переважно низькоосновними гідросилікатами кальцію. У другому випадку як активатор використовують сульфати кальцію (гіпс або наближені до нього за складом речовини), а фазовий склад новоутворень представлений переважно різними видами

гідросульфоалюмінатів кальцію. У третьому випадку активаторами є гідроксиди, силікати або карбонати лужних металів, а новоутворення представлені відповідно лужноземельними або лужними гідросилікатами та гідроалюмосилікатами.

Недоліком сульфатної активації золівмісних цементів є нестабільність у часі гідросульфоалюмінатів, у першу чергу – еtringіту, а також можливість утворення вторичного еtringіту, що може призвести до розвитку деструктивних процесів у структурі бетону, що твердіє [12]. У той же час, як було показано нашими дослідженнями [13], сульфатна активація за наявності силікатних добавок може бути ефективно використана для отримання довговічних золівмісних цементів та матеріалів на їх основі незалежно від технології випалювання вугілля та вилучення золи.

Лужноземельна активація традиційно проводилась з використанням сполук на основі лужноземельних металів (кальцієвмісних речовин: вапна, портландцементу тощо). Отримані таким чином вапняно-зольні в'язучі або пуцоланові портландцементи на основі золи широко використовуються у будівельній галузі. Як правило, традиційний підхід не дозволяє вводити значну кількість золи до складу в'язучої системи, що стримує подальший розвиток концепції використання «високозоловмісних» цементів. Прогрес у розвитку лужних в'язучих [14] дозволив запропонувати інші підходи до вирішення цієї проблеми, що передбачають використання сполук лужних металів. Особливістю таких систем, де використовується лужна **активація**, є високе значення рН дисперсійного середовища.

При правильному підборі складу та концентрації лужного активатора сполуки лужних металів різко інтенсифікують першу стадію хімічної деструкції вихідної алюмосилікатної фази золи, а потім беруть активну участь у процесах синтезу

водостійких елементів мікроструктури та розвитку міцності у часі.

Термічна активація базується на збільшенні розчинності кремнезему та глинозему при підвищенні температури [15]. Що стосується цементів на основі активованих зол, то термічна активація використовується на етапі мокрого помелу або теплової обробки відформованих виробів (пропарювання, автоклавування тощо). Як і у випадку механічної, термічна активація ефективна тільки у поєднанні з хімічною. Слід зазначити, що на відміну від механічної активації, яка визначає переважно кінетичний аспект активації, вибір температури обробки в значному ступені може визначати напрям процесу структуроутворення і, відповідно, фазовий склад новоутворень.

Згідно з результатами багаторічних досліджень [2, 16] для хімічної активації кислої золи як з технологічної, так і з економічної точок зору, найбільш придатним є лужноземельно-сульфатний метод, причому при такій активації додатково потрібно використовувати пуцоланову та пластифікуючу добавки. Введення пуцоланової добавки необхідно для формування довговічного штучного каменю шляхом попередження та запобігання протіканню процесів утворення вторинного еtringіту або таумаситу. Додаткове використання пластифікуючої добавки (враховуючи відносно велику кількість використаної золи у складі в'язучої системи) необхідно як для регулювання реологічних властивостей отриманих бетонних сумішей, так і кінетики набору міцності бетону на ранніх етапах твердіння.

Вибір пластифікуючої добавки здійснюється з урахуванням хімічного складу як базової в'язучої речовини, так і мінеральних добавок, введених додатково. За результатами наших досліджень [16] при використанні сульфатної або лужноземельно-сульфатної активації золи краще застосовувати сульфатвмісні

пластифікуючі добавки, наприклад, добавки суперпластифікаторів із групи нафталінформальдегідів.

З урахуванням вищенаведеної інформації були розроблені фізико-хімічні основи отримання золонаповнених в'язучих систем на основі кислої золи, що передбачали одночасне введення сульфатної, пуцоланової та пластифікуючої добавок. В'язучі композиції були підібрані так, щоб кількість портландцементу не перевищувала 20 мас %. Як сульфатний компонент було використано нерозчинний ангідрит, а як пуцоланову добавку – мікрокремнезем або метакаолін.

З використанням математичних методів планування експерименту було досліджено кінетику набору міцності та процеси гідратації золоцементних композицій, що містять 10 % добавки нерозчинного ангідриту (випаленого при температурі 450 °С), і (5...10) % добавки мікрокремнезему або метакаоліну при різних значеннях водоцементного відношення ($V/C = 0,22; 0,25; 0,28$).

За допомогою фізико-хімічних методів досліджень встановлено, що новоутворення модифікованих в'язучих композицій на ранніх етапах гідратації представлені переважно еtringітом та низькоосновними гідросилікатами кальцію. Кінетика набору міцності на пізніх етапах твердіння стабілізується за рахунок синтезу у складі продуктів гідратації термодинамічно стабільних сполук, представлених низькоосновними гідросилікатами кальцію, модифікованими гідросилікатами кальцію типу епістільбіту та гідрогранатами.

Слід зазначити позитивний вплив мікрокремнезему на експлуатаційні властивості отриманого штучного каменю, але при цьому мають місце деякі технологічні труднощі, пов'язані з введенням цієї добавки до бетонних сумішей та підвищенням собівартості композицій. Для усунення вказаних недоліків видається доцільним у якості

кремнеземистої добавки на заміну мікрокремнезему використовувати метакаолін, який має достатньо високу пуцоланову активність і є більш технологічним та менш дефіцитним продуктом на сучасному будівельному ринку.

Результати дослідження поверхні відколу штучного каменю за допомогою електронної мікроскопії свідчать про залежність форми утворених кристалів еtringіту від наявності у складі в'язучої речовини кремнеземистої добавки та її виду (рис. 1).

При модифікації золоцементних композицій сульфатом кальцію на ранніх етапах твердіння утворюються короткі кристали еtringіту, середня довжина яких складає 5 μm (рис. 1, а–в). В разі модифікації золоцементних композицій сульфатними та кремнеземистими добавками середня довжина утворених кристалів еtringіту значно зростає і досягає 20-30 μm (рис. 1, г–и). В той же час ступінь ущільнення гідратних фаз залежить від виду використаної кремнеземистої добавки і є значно більшим при використанні метакаоліну, ніж мікрокремнезему.

За результатами фізико-механічних досліджень щодо модифікації золоцементних композицій сульфатними та кремнеземистими добавками було виділено композиції оптимального складу (за показниками міцності на ранніх етапах твердіння) та вивчено їхню стабільність міцності у часі на пізніх етапах гідратації (рис. 2). Спад міцності композицій, модифікованих сульфатом кальцію, вірогідно може бути пояснений частковою перекристалізацією еtringіту в моносульфатну форму. Міцність композицій, модифікованих дисперсними кремнеземистими добавками, зберігається стабільною за рахунок стійкого існування еtringіту та утворенням на його основі твердих розчинів з наступним синтезом гідрогранатів.

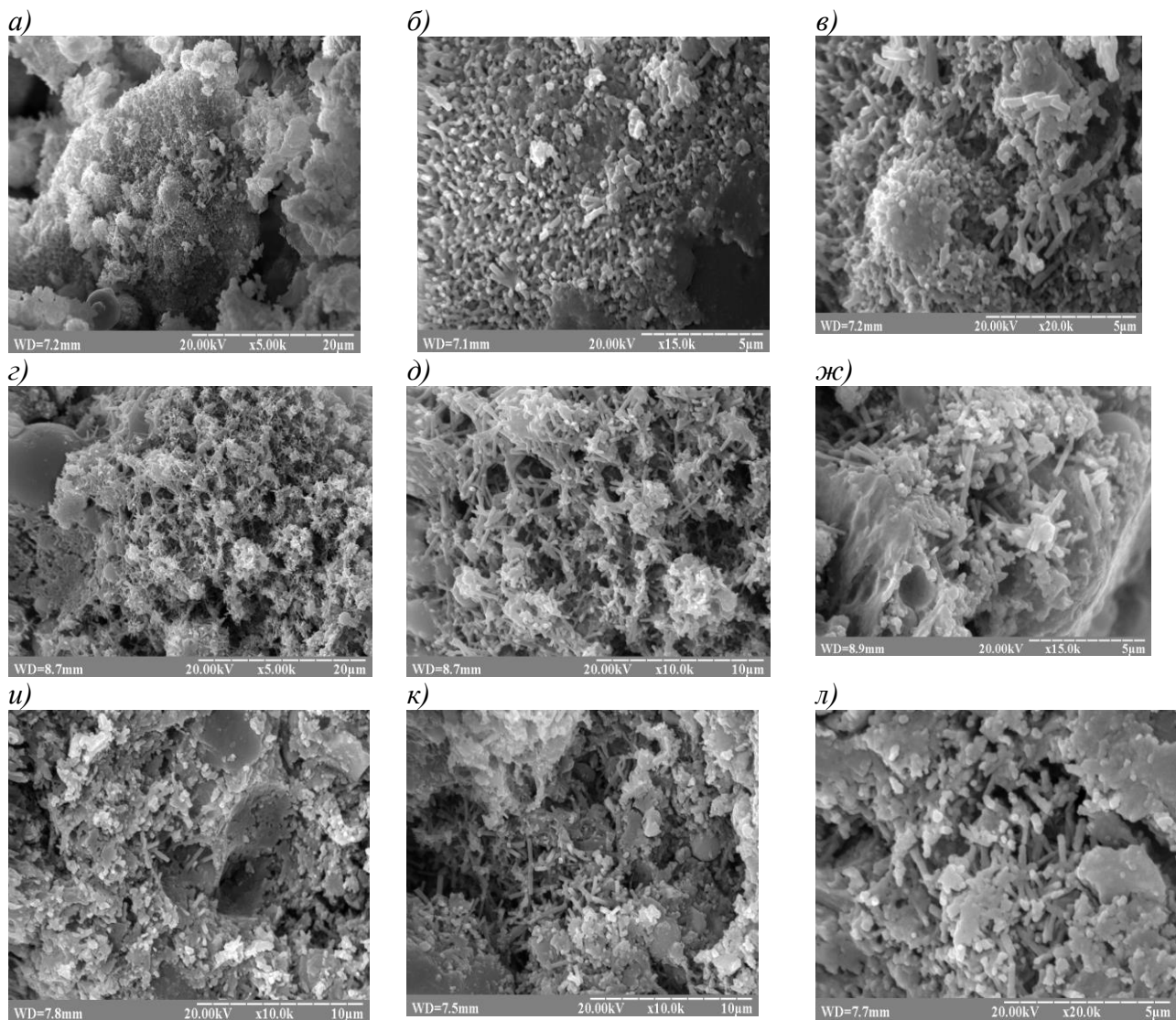


Рис. 1. Фотографії поверхні сколу штучного каменю на основі золоцементної композиції, модифікованої сульфатом кальцію (а-в), а також додатково мікрокремнеземом (г-ж) або метакаоліном (и-л)

Поряд із зазначеними новоутвореннями має місце кристалізація додаткової кількості низькоосновних гідросилікатів типу епістильбіту. На базі запропонованих золоцементних в'язучих речовин із підвищеним вмістом золи (до 65 %) запроєктовано склад бетонних сумішей, що забезпечують отримання бетонів класу В40, пористість яких не перевищує 4 %, а водопоглинання становить до 5 %. Вивчено довговічність розроблених складів бетонів шляхом дослідження їхньої кінетики набору

міцності, зносо-, морозо-, атмосферо- та корозійної стійкості. Встановлено, що введення високодисперсної кремнеземистої добавки (у кількості 8 %) до складу золоцементно-сульфатних систем забезпечує більш рівномірний набір міцності бетонів на всіх етапах твердіння (див. таблицю).

Вивчено корозійну стійкість бетонів на основі золоцементних систем, модифікованих сульфатом кальцію, мікрокремнеземом або метакаоліном, в агресивних середовищах, представлених

розчинами сульфату натрію та магнію. Отримані значення коефіцієнтів корозійної стійкості $K_{c1,2} = 1,22 \dots 2,29$ перевищують показники корозійної стійкості

$K_{c1,2} = 0,78 \dots 1,22$ (для сульфатостійких портландцементів) та $K_{c1,2} = 0,91 \dots 1,4$ (для шлаколузних в'язучих речовин).

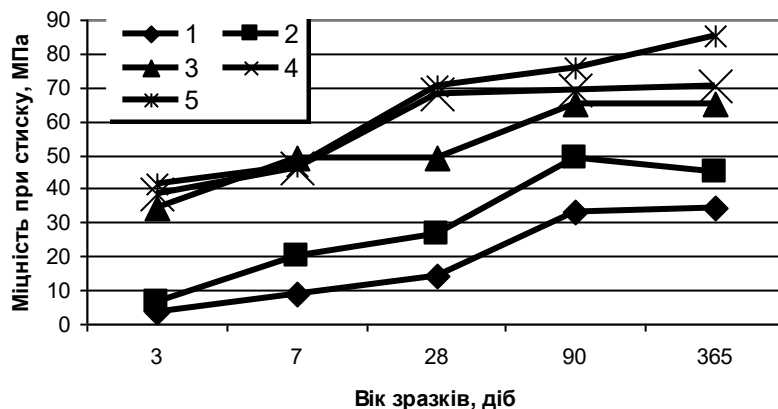


Рис. 2. Кінетика нарощування міцності штучного каменю на основі досліджених композицій: 1 – 20 % портландцементу + 80 % золи; 2 – 20 % портландцементу + 70 % золи + 10 % сульфату кальцію; 3 – 20 % портландцементу + 60 % золи + 10 % сульфату кальцію + 10 % мікрокремнезему; 4 – 20 % портландцементу + 60 % золи + 10 % сульфату кальцію + 10 % метакаоліну; 5 – 100 % портландцементу

Таблиця

Кінетика зміни міцності розроблених складів бетонів на основі модифікованих золоцементних в'язучих речовин

Склад в'язучої композиції, %				Міцність на стиск, МПа, після твердіння, діб				
портланд-цемент	зола	CaSO ₄	метакао-лін	3	7	28	90	365
100	0	0	0	27,8	29,7	66,4	68,9	75,0
20	72	8	0	12,9	17,7	34,2	47,3	45,1
20	68	8	0	21,3	23,3	45,4	55	69,3
20	64	8	8	15,6	24,2	51,6	61,3	71,0

Використання сульфатно-кремнеземистих добавок для активації золовмісних цементів дозволяє отримати в'язучі системи, що відповідають вимогам до цементів європейського класу СЕМ I 42,5 (EN 197-1) при більш високих показниках корозійної стійкості, в тому

числі сульфатостійкості, стійкості до розвитку внутрішньої корозії та дифузії хлоридів, що є особливо важливим при використанні бетонних конструкцій у морській воді.

Розглянутий принцип композиційної побудови золовмісних в'язучих систем

було використано і при розробці будівельних матеріалів на основі флюїдальної золи, яка в своєму складі містить крім алюмосилікатної скловидної фази також сульфат кальцію та вільний СаО [17]. При використанні такої золи як основи для отримання в'язучих систем утворення стабільного складу продуктів гідратації досягається за рахунок «скритої» сульфатної та лужноземельної активації, яка забезпечує направлений синтез твердих розчинів на основі еtringіту, модифікованого сульфат-аніонами. Утворення таких розчинів не тільки стабілізує міцнісні показники штучного каменю у часі, але й запобігає синтезу

вторинного еtringіту та розвитку деструктивних процесів у структурі цементного каменю.

Розроблені склади золівмісних бетонів доцільно впроваджувати при спорудженні об'єктів спеціального призначення, в тому числі у дорожньому та гідротехнічному будівництві. Використання запропонованих технічних рішень дозволяє знизити витрати портландцементу (на 80%), зберегти природі ресурси, скоротити витрати палива та енергії (до 60%) та ефективно вирішувати проблеми охорони навколишнього середовища.

Список літератури

1. Krivenko, P.V. Low-Alkaline High Volume Fly Ash Concretes – An Economic Material for Construction [Text] / Krivenko P.V. et al // In: Bulletin of Nat. Univ. of Water Economy and Environment. – Rivne, 2005. – № 4 (28). – P. 130-136.
2. Пушкарьова, К.К. Перспективні технології утилізації відходів паливно-енергетичної промисловості та ефективність їх застосування при отриманні будівельних матеріалів з підвищеними експлуатаційними характеристиками [Текст] / К.К. Пушкарьова, О.А. Гончар, В.В. Павлюк // Строительные материалы и изделия. – 2005. – № 4. – С. 20-23.
3. Design for Durability and Strength Through the Use of Fly Ash and Slag in Concrete: Proc. Mario Collepardi Symposium [“On Advances in Concrete Science and Technology”], Rome, Italy, 1997/ R. Swamy. – Rome, Italy, 1997. – P. 127-194.
4. Федоркин, С.И. Механоактивация вторичного сырья в производстве строительных материалов [Текст] / С.И. Федоркин. – Симферополь: Таврия, 1997. – 180 с.
5. Setting and Hardening Behavior Using Ultrasound, and Compression strength development of concrete with different levels of cement by fly ash: 2-th International Symposium [“Non-Traditional cement and concrete, Bilck and Kcersner (eds)”], (Brno, 1980) / Nele De Belie, Christian Grosse, Gert Baert. – Brno, ISBN, 1980. – 214. – P. 2853-2858.
6. The Use of Fly Ash in Concrete: A Question of Classification: intern. ash Util. Sympos, (Lexington, Kentucky, 1997) / M.D.A. Thomas. – Lexington, Kentucky, 1997. – P. 333-342.
7. Сергеев, А.М. Использование в строительстве отходов энергетической промышленности [Текст] / А.М. Сергеев. – К.: Будівельник, 1984. – 120 с.
8. Malhotra V.M. High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete Materials, Mixture Proportioning, Properties, Construction Practice, and Case Histories / Malhotra V.M., Mehta P.K. // Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development, Inc. – Ottawa, 2002.
9. Сергеев, А.М. Научные основы массового использования в строительстве отходов энергетической промышленности [Текст] / А.М. Сергеев // В кн. Новые материалы и технологии в промышленном и дорожном строительстве. – К.: Вища школа, 1990. – С. 167-216.
10. Puzzolanic and cementations by-products as mineral admixtures for concrete a critical review. In: Malhotra, VM ed.: Proceeding of the Ist. Intern. Congress on the Use of the Fly Ash,

Silica Fume and Other Mineral By-products in Concrete, (Montedello, Canada, 1983) / P.K. Metha. - Montedello, Canada, 1983. – American Concrete Institute Special Publication 79. – V. 1. – P. 1-46.

11. Babaev Sh.T. Highly Effective Cement-Free Binders Made with Fly Ashes and Slags from HPP, and Concretes Based on Them / Babaev Sh.T., Bashlykov, Sh.F., Falikshan V.R. // Building Materials. – 1991. – №6. – P. 17-18.

12. Stark J., Wicht B. Dauerhaftigkeit von Beton. – Weimar, 1995.

13. Пушкарьова, К.К. Особливості сульфатної активації золоцементних в'язучих систем різними модифікаціями ангідриду [Текст] / К.К. Пушкарьова, О.А. Назим, В.В. Павлюк, В.О. Шевчук, І.М. Павлюк // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2003. – Вип. 22. – С. 36-4.

14. Alkaline Cements: in Proc. First Intern. Conf. ["Alkaline Cements and Concretes"], (Kyiv, 1994) / Krivenko P.V. – P. 11-129

15. Iler R.K. The Chemistry of Silica - Solubility, Polymerization, Colloid and Surface Properties and Biochemistry / Iler R.K. // John Wiley & Sons publish. – 1979.

16. Pushkarova K.K. Physical - chemical foundations for synthesis of a durable artificial stone based on ash-cement-sulfate binding systems / K.K. Pushkarova, V.I. Gots, V.V. Pavljuk // 16 Ibausil. – Weimar, 2006. – P. 1-0829-0836.

17. Pushkarova K.K. Features of Processes Hydration and Hardening of Binding Compositions Based on Fluidized Fly Ash: in Proc. of 7th NCB Int. Seminar on ["Cement and Building Materials"], (New Delhi, 2000) / Pushkarova K.K, Domoslawsky W. – New Delhi, 2000. – P. XI-125-XI-134.

Ключові слова: ресурсозберігаючі технології, золошлакові відходи, активація відходів, золовмісні в'язучі композиції та бетони.

Анотації

Розглянуто проблеми утилізації золошлакових відходів шляхом використання різних видів активації (механічної, хімічної, термічної) з метою отримання ефективних в'язучих матеріалів та бетонів на їх основі. Запропоновані принципи композиційної побудови ефективних в'язучих систем на основі кислих та флюїдальних зол, що дозволяють отримувати високоміцні композиційні матеріали спеціального призначення при мінімальній витраті портландцементу.

Рассмотрено проблемы утилизации золошлаковых отходов путем использования различных методов их активации (механической, химической, термической). Предложены принципы композиционного построения эффективных вяжущих систем на основе кислых и флюидальных зол, которые позволяют получать высокопрочные композиционные материалы специального назначения при минимальном расходе портландцемента.

Considered the problems of utilization of ash and sinder through the use of different methods of their activation (mechanical, chemical, thermal). Proposed principles of the composition of the efficient binding systems on the basis of the fly ash and fluidized ash, which allow to obtain high-strength composite materials of special purpose with minimal use of Portland cement.

УДК 666.948

*Д-р техн. наук Г. М. Шабанова,
кандидати техн. наук А. М. Корогодська (УкрДАЗТ),
Т. Д. Рищенко (ХНАМГ),
асп. Р. М. Ворожбіян (НТУ «ХПІ»)*

*G.M. Shabanova, A.M. Korogodska,
T.D. Ryschenko, R.M. Vorozhbiyan*

ВИСОКОЕФЕКТИВНІ СПЕЦІАЛЬНІ В'ЯЖУЧІ МАТЕРІАЛИ НА ОСНОВІ ЛУЖНОЗЕМЕЛЬНИХ ОКСИДІВ

SPECIAL HIGH BINDING MATERIALS ON THE BASIS OF ALKALINE EARTH OXIDE

Вступ. Якість та експлуатаційні характеристики спеціальних в'язучих матеріалів, які застосовуються для виготовлення бетонів та неформованих матеріалів, створюють необхідність розробки нових складів спеціальних цементів, які зможуть забезпечити надійну та довговічну роботу виробів. Для виготовлення бетонів спеціального призначення використовуються дефіцитні в'язучі речовини, а цементи, які одержані з дешевих матеріалів, обмежуються невисоким терміном експлуатації [1-3].

Актуальність. Основою для створення спеціальних гідравлічних в'язучих матеріалів можуть бути силікати та алюмінати кальцію в поєднанні з тугоплавкими бінарними сполуками. При потужному використанні сировинних ресурсів при виробництві в'язучих матеріалів зменшуються запаси якісної сировини, тому постає проблема розширення сировинної бази України за рахунок використання відходів хімічного, металургійного та інших виробництв. Актуальне вирішення питання створення ресурсозберігаючих технологій спеціальних цементів та бетонів на їх основі є сучасною задачею, що також сприяє поліпшенню екологічної ситуації промислових регіонів України.

Основна частина. При безперервному споживанні природної сировини у виробництві цементу все менше залишається відносно чистих сировинних джерел. Поблизу заводів необхідні вапняки, як правило, вироблені. Застосування доломітизованих вапняків з підвищеним вмістом оксиду магнію може знизити міцність цементу та призвести до руйнування споруди через спізнену гідратацію оксиду магнію у бетоні [4-8]. З цього виникає необхідність використання у виробництві в'язучого, відходів виробництва Горлівського ВАТ "Концерн Стірол", на якому накопичилося більше 20 тис. тонн відходів водоочищення, які утворилися в результаті очищення стічних вод хімічним методом нейтралізації.

Стічні води, які містять неорганічні домішки, необхідно очищати перед тим, як скинути їх до водоймищ, перед використанням їх в технологічних процесах проводять нейтралізацію. Нейтральними є води, які мають рН=6.5-8.5.

Нейтралізацію можна проводити різноманітними шляхами: змішуванням кислих та лужних стічних вод, добавкою реагентів, фільтруванням кислих вод крізь нейтралізуючі матеріали, абсорбцією кислих газів лужними водами або абсорбцією аміаку кислими водами.

Осад карбонату кальцію осаджується в циркуляційній камері за допомогою фізико-хімічних методів аналізу проведені дослідження фазового та хімічного складу відходів. За даними хімічного аналізу склад відходів такий, мас. %: CaCO_3 – 75,0 – 85,0; MgCO_3 – 3,0 – 9,0; Fe_2O_3 – 4,5 – 8,5; CaSO_4 – 1,5 – 3,0; SiO_2 – 5,0 – 9,0.

Проведені рентгенографічні дослідження відходів водоочищення, результати яких наведено на рис. 1.

На рентгенограмі ідентифікуються дифракційні максимуми, які відповідають сполукам CaCO_3 (3.853; 3.033; 2.492; 2.281; 2.031; 1.924; 1.91; 1.871; 1.602 Å), MgCO_3 (2.737; 1.697; 2.091; 2.492 Å).

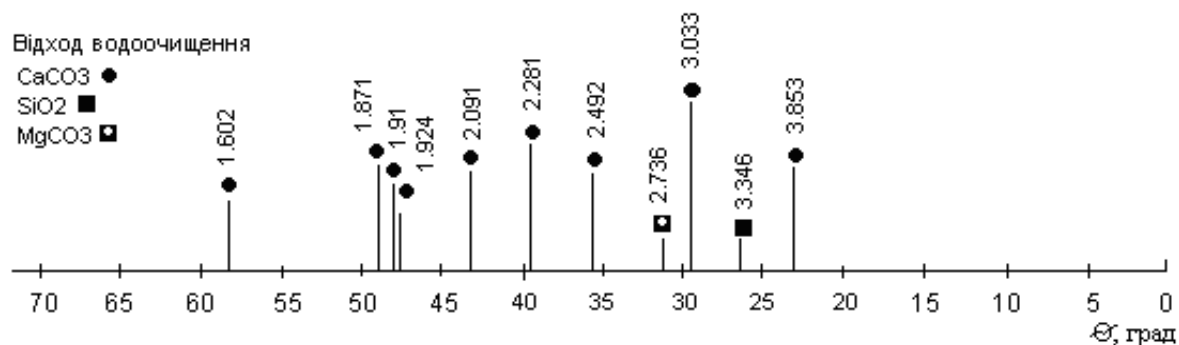


Рис. 1. Рентгенографічні дослідження відходів водоочищення

Таким чином, проведені фізико-хімічні методи аналізу відходів водоочищення дозволили зробити висновок, що основними сполуками, які входять до складу відходів, є карбонати кальцію та магнію, які можуть бути використані як сировинні матеріали для виробництва спеціальних цементів.

Для дослідження використовувалися сировинні матеріали: відходи водоочищення Горлівського ВАТ “Концерн Стірол”, технічний глинозем марки Г-00 (ДСТУ 69-12-94), хімічний склад яких наведено в табл. 1, хімічний склад клінкеру подано в табл. 2.

Таблиця 1

Хімічний склад сировини

Сировина	Вміст оксидів, мас %						
	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	R ₂ O	Al ₂ O ₃	в.п.п.
Відходи	41,29	7,78	2,98	2,98	0,67	-	41,74
Глинозем	-	-	0,05	0,06	0,43	98,46	1,00

Таблиця 2

Хімічний склад клінкеру

№	Хімічний склад, мас %		
	CaO	MgO	Al ₂ O ₃
1	31,93	2,83	65,24
2	28,38	5,66	65,96
3	24,84	8,49	66,67

Для оптимізації технологічних параметрів синтезу була виготовлена сировинна суміш у кількості 3 кг, яка мала склад: відходи – 49,15 мас. % та технічний глинозем – 50,85 мас. %.

Сировинні матеріали були взяті у відповідному співвідношенні, подрібнення відбувалось у фарфоровому кульовому млині до повного просіювання крізь сито № 008 (вологість суміші складала 40-50 мас. %), потім висушувалася при температурі 100-110 °С, формували зразки діаметром 50 мм та висотою 50 мм на гідравлічному пресі.

Синтез зразків здійснювався у криптоловій печі при заданих температурах та ізотермічній витримці.

Швидкість підняття температури в печі – 50-70 гр/хв, вимір температури здійснювався за допомогою оптичного пірометра. Після випалу зразки мололися до повного просіювання крізь сито № 008. Були проведені фізико – механічні випробування синтезованих цементів. Визначено на зразках, виготовлених з тіста нормальної крутості, міцність цементів. Випробування відбувалися згідно з методикою малих зразків, розробленою М.І. Стрелковим.

Твердіння зразків відбувалось у вологих умовах 2, 7 та 28 діб, після чого були проведені випробування на міцність. Результати випробувань наведено у табл. 3.

Таблиця 3

Оптимізація технологічних параметрів синтезу цементу

№	Температура синтезу, С°	Ізотермічна витримка, год	Межа міцності на стиск, МПа		
			2 доби	7 діб	28 діб
1	1200	3	-	20,5	25,0
2	1300	3	34,8	52,6	60,0
3	1400	3	61,0	79,4	82,0

Як видно з поданих результатів, оптимальними параметрами синтезу цементу з використанням відходів водоочищення є температура – 1400 °С та ізотермічна витримка при максимальній температурі – 3 години. Водоцементне відношення та нормальну крутість цементу

визначали на приладі Віка. Твердіння виготовлених зразків (хімічний склад яких наведено в табл. 2.) здійснювалося у вологих умовах з наступним випробуванням після 2, 7 та 28 діб твердіння. Результати випробувань наведено в табл. 4.

Таблиця 4

Фізико-механічні властивості цементу

№	В/Ц	Термін тужавіння год-хв		Границя міцності на стиск, МПа		
		початок	кінець	3 доби	7 діб	28 діб
1	0,25	0-50	1-45	61,0	79,4	82,0
2	0,25	1-10	2-00	48,6	65,6	70,2
3	0,25	1-20	2-10	42,8	58,4	61,4

Як видно з наведених даних, усі розроблені склади цементів належать до гідралічних в'язучих речовин з низьким водоцементним відношенням (0,25), є швидкоотжувачивними (термін отжування: початок 50 хв – 1 год 20 хв; кінець – 1 год 45 хв – 2 год 10 хв), швидкоотвердними (границя міцності на стиск при 2 добах твердіння 40-60 МПа) та високоміцними (границя міцності на стиск після 28 діб твердіння 61,4 - 82 МПа).

Проведені петрографічні дослідження підтвердили вміст у клінкері алюмінатів кальцію різної основності. У зразку під поляризаційним мікроскопом є безкольорові призматичні кристали із показниками $N_g=1,663$ і $N_p=1,643$, які від-

повідають $CaAl_2O_4$ вмісту ~ 60 – 65 мас %. Також спостерігаються зерна безбарвні, призматичні кристали, пластинки з показником заломлення $N_g=1,652$ і $N_p=1,618$, які відповідають $CaAl_4O_7$, їх у клінкері ~ 20-25 мас %, а також зерна магнезійної шпінелі ~ 6-8 мас %.

На рентгенограмі клінкеру (рис. 2) встановлено, що основними клінкерними мінералами є $CaAl_2O_4$ (4,67; 4,044; 3,712; 3,195; 3,06; 2,971; 2,873; 2,85; 2,533; 2,516; 2,44; 2,418; 2,40; 2,265; 2,194; 2,132; 2,925 Å), $CaAl_4O_7$ (4,67; 4,45; 3,604; 3,503; 3,06; 2,873; 2,759; 2,71; 2,598; 2,533; 2,44; 2,40; 2,194; 1,799 Å), $MgAl_2O_4$ (4,67; 2,85; 2,44; 2,337; 2,022; 1,66 Å), а також $CaAl_2O_6$ (1,961; 1,916; 1,56; 1,557 Å).

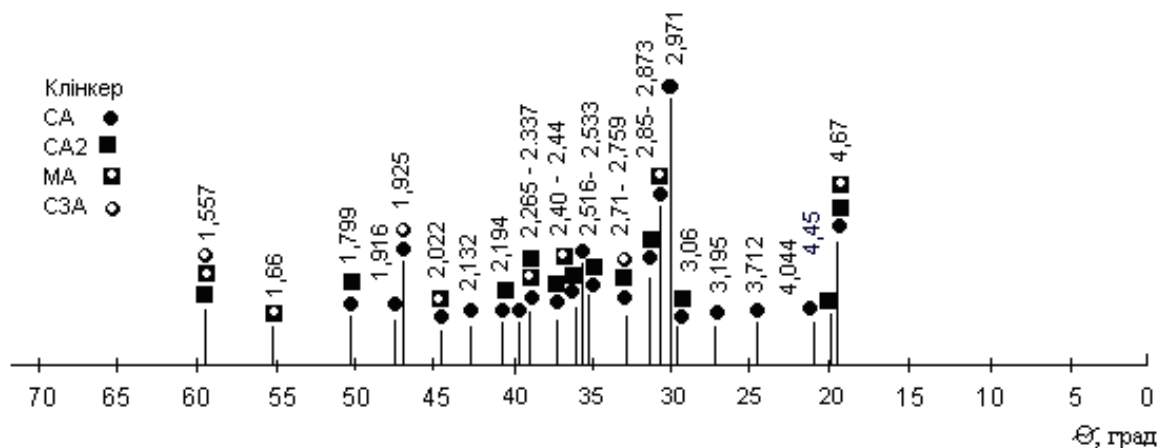


Рис. 2. Рентгенограма клінкеру

Таким чином, комплексом сучасних фізико-хімічних методів аналізу встановлено, що основними клінкерними мінералами цементу на основі відходів водоочищення є моноалюмінат і діалюмінат кальцію, а також магнезійна шпінель.

Оптимальним складом є склад № 1, оскільки він має найвищі показники міцності. Рентгенограми цементного каменю у віці 7 і 28 діб не відрізняються один від одного, про що свідчать дані,

отримані за допомогою рентгенографічного аналізу.

На рентгенограмі гідратованого цементу (рис. 3) чітко ідентифікуються дифракційні максимуми гідроалюмінатів кальцію: CAH_{10} (7,16; 3,559; 2,533; Å), C_4AH_{13} (4,672; 4,453; 4,044; 2,873; 2,85; 2,439; 2,328 Å), гібсит $Al(OH)_3$ (4,87; 4,379; 2,378; Å), CA (2,971; 3,297; 3,195; 3,058 Å) та CA_2 (3,503; 2,597; 2,42; Å), магнезійна шпінель MA (7,42; 2,85; Å).

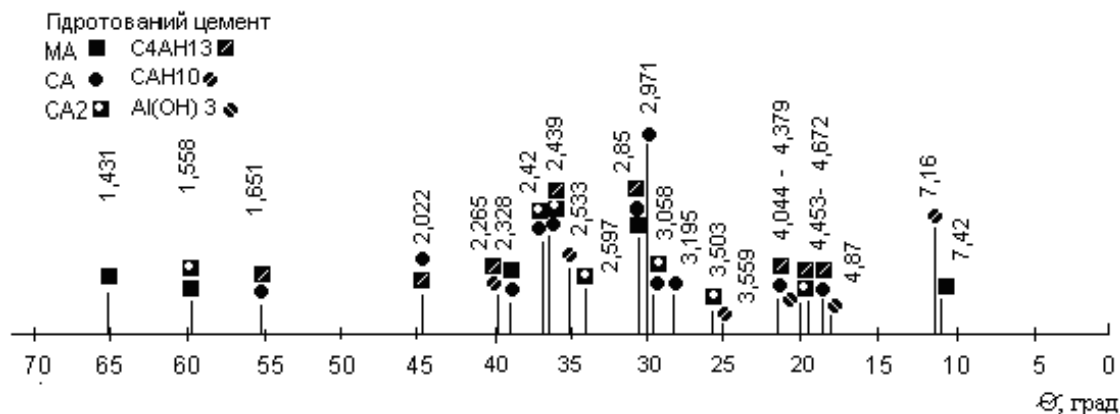


Рис. 3. Рентгенограма гідратованого цементу

Висновок. Таким чином, проведені дослідження дозволили встановити, що висока міцність цементу обумовлена вмістом у ньому гідроалюмінатів кальцію різної основності, гідроксиду алюмінію, а також непрогідратованих зерен алюмініатів

кальцію та магнію, які в даному випадку є центрами кристалізації. Саме таке поєднання фаз як в кристалічному, так і колоїдному стані і забезпечує високу міцність цементного каменю.

Список літератури

1. Кузнецова, Т.В. Глиноземистый цемент [Текст] / Т.В. Кузнецова, Й. Талабер – М.: Стройиздат, 1988. – 265 с.
2. Мельник, М.Т. Огнеупорные цементы [Текст] / М.Т. Мельник, Н.Г. Илюха, Н.Н. Шаповалова. – К.: Вища школа, 1984. – 121 с.
3. Бутт, Ю.М. Химическая технология вяжущих материалов / Ю.М. Бутт, М.М. Сычев, В.В. Тимашев. – М.: Высшая школа, 1980. – 472 с.
4. Получение материалов специального назначения на основе отходов очистки сточных вод химических производств [Текст] / А.Н. Кожанова, Г.Н. Шабанова, Е.А. Семенченко, Я.Н. Питак // Современные проблемы химической технологии неорганических веществ: междунар. науч.-техн. конф. (22 – 25 мая 2001 г.): сб. науч. тр. – Одесса: Астропринт, 2001. – Т. 2. – С. 67-69.
5. Фізико-хімічні дослідження клінкеру цементу, отриманого з відходів водоочищення [Текст] / О.О. Семенченко, Г.М. Шабанова, З.І. Ткачова, С.З. Зеленцов // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ, 2000. – Вып. 123. – С. 77-80.
6. Получение вяжущих материалов на основе отходов очистки сточных вод [Текст] / Г.Н. Шабанова, Е.А. Гапонова, Н.К. Вернигора, Н.С. Цапко [и др.] // Научные исследования, наносистемы и ресурсосберегающие технологии в стройиндустрии: междунар. научн.-практ. конф. (18-19 сент. 2007 г.): сб. докл. – Белгород: БГТУ, 2007. – С. 308-311.
7. К вопросу об использовании отходов водоочистки в производстве глиноземистого цемента [Текст] / Г.М. Шабанова, Р.М. Ворожбян, А.Н. Корогодская // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2011. – Вип. 27. – С. 164-173.
8. Установление возможности использования отходов промышленности в производстве глиноземистого цемента / Г.М. Шабанова, Р.М. Ворожбян, А.Н. Корогодская, О.В. Костыркин // Зб. наук. праць. – Вип. 122. – Харків: УкрДАЗТ, 2011. – С. 288-292.

Ключові слова: цемент, в'язучі матеріали, бетони, відходи водоочищення, відходи виробництва, алюмінати кальцію, дифракційні максимуми, клінкер.

Анотації

У статті наведені результати досліджень сировинного матеріалу на базі відходів водоочищення Горлівського ВАТ "Концерн Стірол". Результати аналізу шламу дають можливість використовувати його у вигляді сировинного компонента глиноземистого цементу. Актуальністю даної теми є не тільки зниження витрат на сировинні матеріали, але й поліпшення навколишнього екологічного середовища.

В статье приведены результаты исследований сырьевого материала на базе отхода водоочистки Горловского ОАО "Концерн Стирол". Результаты анализа шлама дают возможность использовать его в виде сырьевого компонента глиноземистого цемента. Актуальностью данной темы является не только снижение затрат на сырьевые материалы, но и улучшение окружающей экологической среды.

The article presents the results of investigations on the basis of raw material waste water treatment of Gorlovskij "Stirol". The results of sludge analysis give an opportunity to use it as a raw material component alumina cement. Relevance of the topic is based on not only lower costs for raw materials, but also the improvement of the ecological environment.

УДК 666.97

*Доктора техн. наук Л.И. Дворкин,
О.Л. Дворкин (НУВХП, г.Ровно)*

L.I. Dvorkin, O.L. Dvorkin

МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСТАВОВ БЕТОНА

MULTIPARAMETRIC CONCRETE COMPOSITIONS DESIGN

Многолетний опыт применения бетона показывает, что главным условием его эффективности и надежности является соответствие качественных показателей материала особенностям работы в конструкциях и сооружениях. Всесторонний учет этих особенностей необходим при назначении проектных требований и проектировании оптимальных составов бетонной смеси, обеспечивающих комплекс требуемых

свойств, – *многопараметрическом проектировании составов бетона (МПСБ).*

В современной строительной практике широко используется расчетно-экспериментальный метод проектирования составов бетона с требуемой удобоукладываемостью бетонной смеси и прочностью бетона [1...5]. Этот метод основан на ряде объективных зависимостей: прочности бетона от водоцементного отношения (правило В/Ц),

водопотребности бетонной смеси от показателя удобоукладываемости в определенном диапазоне В/Ц (правило постоянства водопотребности), расхода цемента от содержания песка в смеси заполнителей при постоянном В/Ц (правило оптимальной доли песка в смеси заполнителей) и др. [2,3].

Наряду с развитием исследований по схеме структура-состав-свойства бетона совершенствование расчетной методологии проектирования составов бетона идет за счет применения математического моделирования, при котором реализуется кибернетический подход к решению сложных технических задач.

Математические модели, например в виде полиномиальных уравнений, позволяют находить значения факторов состава при заданных или максимально

(минимально) возможных значениях показателей свойств бетона при заданных условиях оптимальности и ограничениях.

Еще основоположник практической методологии проектирования составов бетона Д. Абрамс указывал, что составы бетона должны обеспечивать необходимые свойства бетона наиболее эффективным образом [5]. Практика допускает применение разнообразных простых и комплексных, технических, экономических и технико-экономических критериев оптимальности (табл. 1). Критерии оптимальности в задачах оптимизации состава бетона могут стремиться к некоторому абсолютному или условному экстремуму, а в многокритериальных задачах находятся в компромиссной области.

Таблица 1

Основные критерии оптимальности при проектировании составов и структуры бетона

$P_i \rightarrow \max (\min),$ где P_i – подвижность бетонной смеси, прочность, морозостойкость, усадка бетона и др (или комплекс однозначно связанных свойств)
$\frac{P_i}{X} \rightarrow \max (\min),$ где X – удельный расход цемента, заполнителей, добавок, тепловой, электрической энергии и др.
$X \rightarrow \min$
$\frac{X}{P_i} \rightarrow \min$
$C \rightarrow \min,$ где C – стоимость 1 м ³ бетона, конструкции, сооружения; стоимость ресурсов; прибыль; приведенные затраты и др.

Наиболее характерными при оптимизации составов бетона являются задачи, предполагающие достижение условного экстремума, т.е. максимально (минимально) возможного значения критерия при заданных ограничениях

(например, минимально возможного расхода цемента при заданных значениях прочности бетона, удобоукладываемости бетонной смеси и др.).

Для определения цементно-водного отношения, обеспечивающего заданную

прочность бетона при сжатии, нашли распространение количественные зависимости, основанные на известной формуле Болемея, которые позволяют с помощью обобщенных коэффициентов A и b ориентировочно учесть изменчивость исходных материалов и структуры бетона [1]:

$$R_b = A R_{ц} (Ц/В - b), \quad (1)$$

где A , b – эмпирические коэффициенты.

При высоком уровне стабильности качества исходных материалов и при отсутствии предварительных экспериментальных данных широко используются для нахождения составов справочные рекомендации в виде таблиц или графиков [4].

Для обеспечения высокой надежности работы бетона в конструкциях и сооружениях необходимо наряду с

прочностью нормировать параметры и других свойств бетона (морозостойкости F , водонепроницаемости W , усадочных деформаций $\epsilon_{ус}$ и др.). Решение этой задачи требует часто трудоемких и длительных лабораторных подборов составов бетона. Как в ряде европейских, так и американских стандартах задачу обеспечения проектных свойств бетона предлагается решать ориентировочно с помощью ограничений по водоцементному отношению ($В/Ц$). Обычно предлагается [4] ограничивать $В/Ц$ исходя из условий эксплуатации бетона (табл. 2).

При всей важности $В/Ц$ как одного из интегральных параметров качества бетона, можно утверждать, что не все показатели нормируемых свойств бетона однозначно связаны с $В/Ц$ [1,5].

Таблица 2

Рекомендуемые [4] максимальные значения $В/Ц$

Тип конструкции	Максимальные $В/Ц$	
	Увлажняемые конструкции, подвергаемые действию замораживания и оттаивания	Конструкции, подвергаемые воздействию морской воды или сульфатной среды
Тонкостенные и густоармированные конструкции	0,45	0,40
Другие виды конструкций	0,5	0,45

В общем виде задача проектирования составов бетона с комплексом различных свойств сводится к схеме, приведенной на рис. 1. В соответствии с этой схемой при нормировании различных свойств возможен интервал значений не только по $В/Ц$, но и по другим параметрам состава (расходу воды, доле песка в смеси заполнителей, содержанию цемента, расходу вовлеченного воздуха). При этом обеспечивать нормируемые свойства бетонной смеси и бетона целесообразно во многих случаях при некоторых компо-

мисных значениях параметров состава бетона, обеспечивающих экономию ресурсов.

Для многопараметрического проектирования составов бетона удобно использование комплекса расчетных зависимостей, связывающих требуемые показатели соответствующих свойств и параметры состава. В табл. 3 приведены примеры расчетных зависимостей, предложенных нами на основе экспериментальных данных [3], которые наряду с другими известными зависимостями можно использовать в алгоритмах проектирования составов.

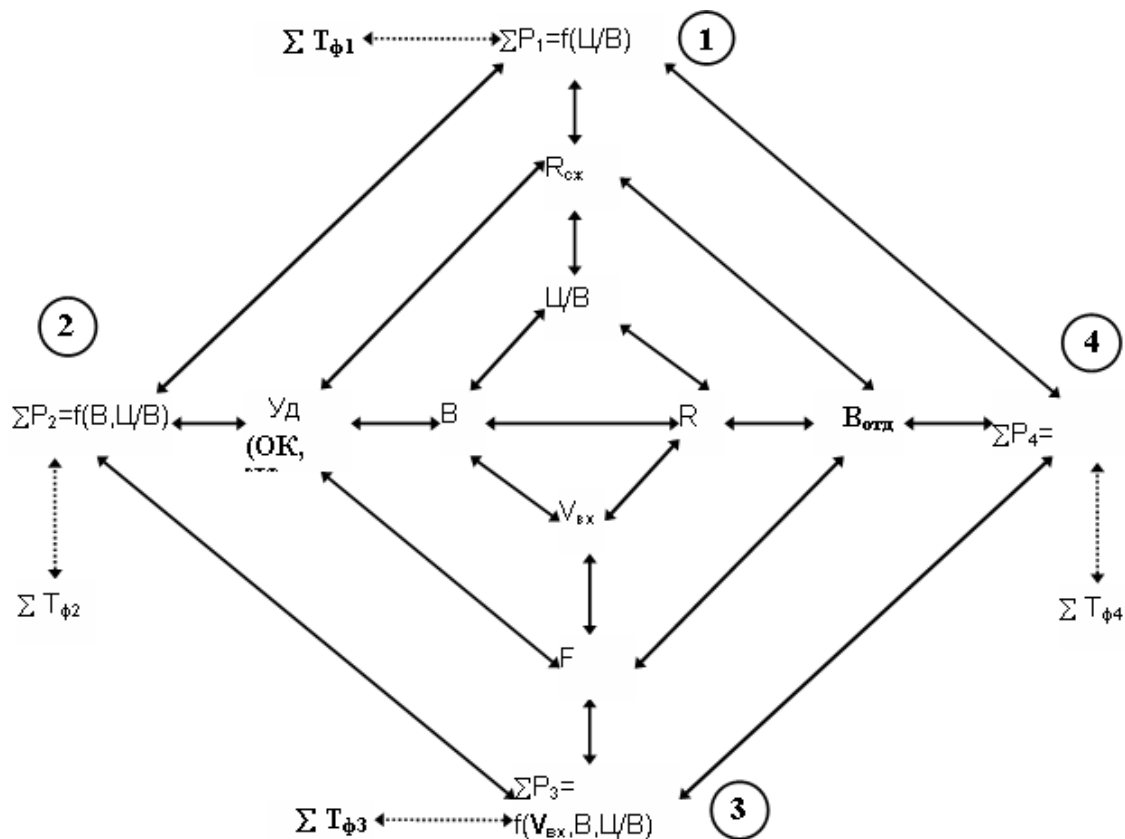


Рис. 1. Блок-схема многопараметрического проектирования составов бетона (ΣP – группа свойств бетона, связанных с определенными смесевыми параметрами; ΣT_{ϕ} – группа технологических факторов, влияющих на свойства бетона): 1 – определение $R_{сж}$ для достижения $\Sigma P_1=f(\text{Ц/В})$ и требуемого Ц/В; 2 – определение расхода воды (В) для достижения $\Sigma P_2=f(\text{В, Ц/В})$; 3 – определение объема вовлеченного воздуха ($V_{вх}$) для достижения $\Sigma P_3=f(V_{вх}, \text{В, Ц/В})$; 4 – определение параметра доли песка с смеси заполнителей (r) для достижения $\Sigma P_4=f(r, V_{вх}, \text{В, Ц/В})$ F – морозостойкость бетона; УД, $V_{отд}$ – соответственно удобоукладываемость и водоотделение бетонной смеси

Для более полного учета параметров состава, технологии изготовления и твердения бетона возможно увеличение прогнозирующей способности расчетных зависимостей с помощью введения мультипликативных коэффициентов, интегрирующих влияние ряда факторов (условий твердения, химических добавок и т.д.), и использования правила "приведенного" Ц/В.

Выражение мультипликативного коэффициента rA_i в формуле прочности бетона (1) можно представить в виде:

$$rA_i = A A_1 \dots A_i \dots A_n, \quad (2)$$

где A_i – эмпирический коэффициент, учитывающий дополнительное влияние на выход прочности i -го фактора ($i=1 \dots n$). Коэффициент A можно находить с учетом известных рекомендаций [1, 2].

Эмпирические формулы для расчета показателей свойств бетона

Свойства бетона	Эмпирическая формула
1. Прочность бетона на растяжение при изгибе ($R_{p.и.}$), МПа	$R_{p.и.} = 0,045R_{ц} (Ц/В + 0,064)$
2. Прочность бетона на растяжение при раскалывании ($R_{p.р.}$), МПа	$R_{p.р.} = 0,031R_{ц} (Ц/В + 0,064)$
3. Прочность бетона при осевом растяжении ($R_{o.р.}$), МПа	$R_{o.р.} = 0,026R_{ц} (Ц/В + 0,064)$
4. Динамический модуль упругости (E_d), 10^4 МПа	$E_d = 205R_{ц} (Ц/В + 2,18)$
5. Условная деформативность (ϵ_y)	$\epsilon_y = \frac{R_{p.р.}}{E_d} = 4 \cdot 10^{-6} R_{ц} (Ц/В + 1,5)$
6. Морозостойкость (F)	$F = A_1 R_{сж}^{A_2} \exp^{0,35} V_{вх}$ Значения коэффициентов A_1 и A_2 зависят от водосодержания бетонных смесей ($A_1=0,34...2,48$; $A_2=1,68...1,25$)
7. Коэффициент фильтрации бетона (K_ϕ)	$K_\phi = AR_{сж}^m$ Для рядовых материалов $A \approx 126$; $m \approx 7,7$

Примечание: $R_{ц}$ – активность цемента; $R_{сж}$ – прочность бетона при сжатии.

Правило В/Ц в традиционной формулировке справедливо при определенных ограничениях для тяжелых бетонов и не учитывает влияние минеральных добавок, объема вовлеченного воздуха, пористости заполнителей. Исходя из общей физической гипотезы о решающем влиянии на прочность бетона отношения объема гидратированного цемента к общему объему пор, целесообразно использовать правило, констатирующее однозначную связь прочности бетона с "приведенным Ц/В" (правило "приведенного Ц/В"), учитывающее наряду с цементно-водным отношением влияние объема пор, обусловленных заполнителями и вовлеченным воздухом, а также возможность частичной замены цемента активными минеральными добавками:

$$(Ц/В)_{пр} = \frac{Ц + K_{ц,э}Д}{В + П_3 V_3 + V_{вх}}, \quad (3)$$

где $V_{вх}$ – объем воздуха, находящийся в бетонной смеси; $Д$ – расход минеральной добавки, кг/м³; $K_{ц,э}$ – коэффициент цементирующей эффективности или "цементный эквивалент" 1 кг добавки; $П_3$ – пористость заполнителя; V_3 – абсолютный объем пористого заполнителя, л/м³.

Однозначная связь прочности бетона с "приведенным Ц/В" справедлива как для тяжелых, так и легких бетонов (рис. 2), а также бетонов с активными добавками и позволяет выполнять расчет их составов по физически обоснованным алгоритмам.

Для определения Ц/В, обеспечивающего прочность бетона в 28-суточном возрасте, удобно использовать обобщенную формулу прочности бетона [3]:

$$R_{сж} = pA_i R_{ц} ((Ц/В)_{пр} - 0,5). \quad (4)$$

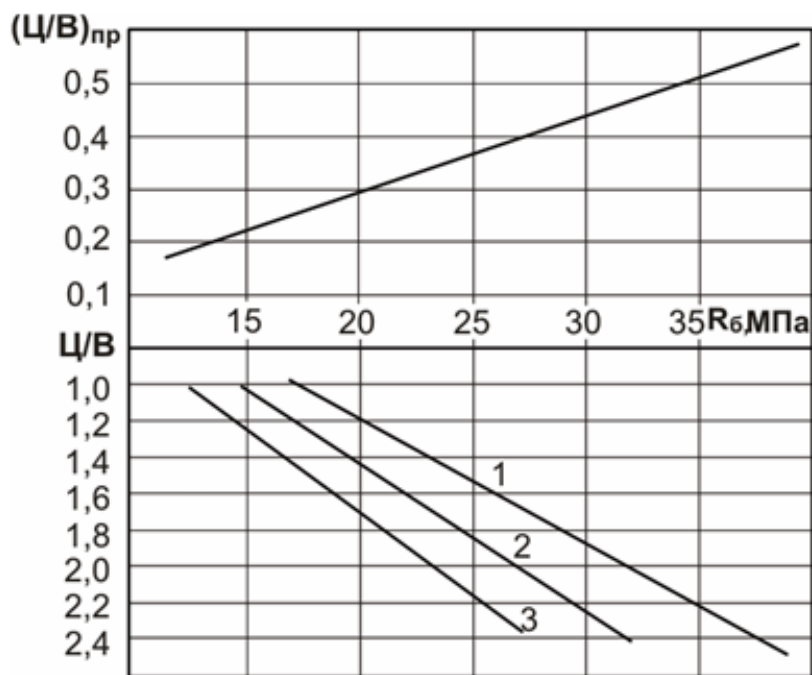


Рис. 2. Зависимость прочности конструктивных керамзитобетонов от Ц/В и $(C/V)_{пр}$:
1 – пористость керамзита 0,4; 2 – 0,55; 3 – 0,7

Все задачи МПСБ можно разделить на два типа:

1) рецептурные задачи, заключающиеся в определении удельных расходов компонентов, обеспечивающих нормируемый комплекс свойств бетона;

2) рецептурно-технологические задачи, заключающиеся в определении наряду с удельными расходами компонентов значений тех или иных технологических факторов, характеризующих условия получения и твердения бетонной смеси и бетона.

Задачи обоих типов являются оптимизационными и могут считаться решенными лишь при выполнении сформулированных условий оптимальности.

Алгоритмы рецептурных задач (рис. 1) предполагают нахождение базовых параметров смеси – цементно-водного отношения (Ц/В), расхода воды (В), объема

вовлеченного воздуха ($V_{вх}$) и доли песка в смеси заполнителей (γ), обеспечивающих наиболее эффективным образом комплекс нормируемых свойств. Алгоритмы рецептурно-технологических задач (рис.1) предполагают кроме определения базовых параметров смеси и нахождения оптимальных параметров технологических процессов ($\sum T_{\phi}$) (температуру, длительность твердения, режимов уплотнения и т.п.).

Последовательность нахождения параметров смеси определяется особенностями конкретных задач МПСБ. Ниже для примера приведены возможные схемы определения Ц/В в задачах с нормируемыми (требуемыми) значениями прочности при сжатии ($R_{сж}^{тр}$) и морозостойкости ($F^{тр}$).

Задача А

Условие:

$$R_{сж} = R_{сж}^{тр}$$

$$F \geq F^{тр}$$

Не вводится воздухововлекающая добавка

Решение:

$$\left. \begin{array}{l} 1. R_{сж}^{тр} = f(\text{Ц/В})_1 \\ 2. F = f(\text{Ц/В})_2 \end{array} \right\} \text{Ц/В}$$

При $(\text{Ц/В})_1 > (\text{Ц/В})_2$ Ц/В = $(\text{Ц/В})_1$

При $(\text{Ц/В})_2 > (\text{Ц/В})_1$ Ц/В = $(\text{Ц/В})_2$

Реализация приведенных и других подобных алгоритмов возможна благодаря однозначной связи группы важнейших физико-механических свойств бетона с Ц/В. В эту группу свойств входят прежде всего прочностные показатели, ряд деформативных и других свойств, определяемых соотношением объема гидратированного цемента и пористости бетона.

Ряд других свойств бетона могут определяться другими показателями состава (расходом воды, долей песка в смеси заполнителей и др). При отсутствии однозначных зависимостей приходится решать более сложные многофакторные задачи.

При выборе количественных зависимостей должны рассматриваться как целевая установка конкретной задачи, так и имеющаяся исходная информация. Например, для простейших задач, включающих определение прочности тяжелого бетона в условиях нормального твердения без минеральных, воздухововлекающих и других добавок, могут быть использованы наиболее известные формулы [5]. При наличии развернутой информации о качестве исходных материалов коэффициент А в формулах прочности бетона уточняется

Задача Б

Условие:

$$R_{сж} = R_{сж}^{тр}$$

$$F \geq F^{тр}$$

Вводится воздухововлекающая добавка ($V_{вх}$ – объем вовлекаемого воздуха)

Решение:

$$1. F = f(R_{сж}, V_{вх}^{тр})$$

$$\text{при } R_{сж} = R_{сж}^{тр}$$

$$2. R_{сж}^{тр} = f(\text{Ц/В}, V_{вх})$$

$$\text{при } V_{вх} = V_{вх}^{тр}$$

согласно рекомендациям [1,2], в противном случае берется по укрупненным рекомендациям или вообще не учитывается [5].

В ряде многопараметрических задач достижение комплекса нормируемых свойств невозможно без специальных технологических средств – применения добавок, регулирования температуры и др. В частности, без применения таких технологических средств могут оказаться недостижимыми требования обеспечения высокой подвижности бетонной смеси и низкой усадки, пониженного тепловыделения и высокой прочности и т. д. В еще большей мере усложняются задачи при ограничениях технологических параметров (температуры, длительности твердения, типа опалубки и др.).

В табл. 4 приведены некоторые примеры решения задач МПСБ, иллюстрирующие указанное положение.

Оптимизация составов бетонных смесей в задачах МПСБ предполагает сужение интервалов по параметрам смеси и сдвиг необходимых значений Ц/В и В в меньшую сторону. Выбор оптимизационных решений проводится с учетом конкретных возможностей и ограничений и направлен на достижение заданных условий оптимальности.

Примеры определения Ц/В и В в задачах МПСБ

<p>Определить необходимое Ц/В для получения бетона на рядовых материалах ($R_{ц}=50$ МПа):</p> <p>1) с пределом прочности при сжатии в 28 сут. $R_{сж}=30$ МПа и растяжении при изгибе $R_{р.и} = 4$ МПа</p>	
<p>Основные расчетные формулы:</p> $R_{сж} = 0,4 \cdot K \cdot R_{ц} \cdot Ц/В$ <p style="text-align: center;">($K=0,95$)</p> $R_{р.и} = 0,08(10R_{сж})^{2/3}$	<p>Расчетные Ц/В:</p> $Ц/В_{R_{сж}} = 1,58$ $Ц/В_{R_{р.и}} = 1,86$
$Ц/В_{R_{р.и}} > Ц/В_{R_{сж}}$	
<p>2) с пределом прочности при сжатии в 28 сут. $R_{сж}=30$ МПа и тепловыделением $Q=68000$ кДж ($B=190$ л/м³)</p>	
<p>Основные расчетные формулы:</p> $R_{сж} = 0,4 \cdot K \cdot R_{ц} \cdot Ц/В$ <p style="text-align: center;">($K=0,95$)</p> $Q = g_7 Ц$ $g_7 = 26,15R_{ц}^{2/3}$	<p>Расчетные Ц/В:</p> $Ц/В_{R_{сж}} = 1,58$ $Ц/В_Q = 1,01$
$Ц/В_{R_{сж}} > Ц/В_Q$	
<p>3) с подвижностью бетонной смеси $OK=20$ см ($B=220$ л/м³) и усадкой $\epsilon_{yc}=0,3$ мм/м</p>	
<p>Основные расчетные формулы:</p> $\epsilon_{yc} \cdot 10^6 = 0,125B\sqrt{B}$ $B = f(OK)$	<p>Расчетные расходы воды [1,2]:</p> $V_{OK} = 220 \text{ л/м}^3$ $V_{yc} = 179 \text{ л/м}^3$
$V_{OK} > V_{yc}$	

Решение задач многопараметрического проектирования составов бетона целесообразно выполнять с помощью набора компьютерных программ или компьютерных систем, позволяющих рассчитывать базовые составы, корректировать их с учетом производственной

информации, проводить статистический контроль прочности и других нормируемых свойств бетона, а также решать ряд смежных задач, связанных с материально-техническим обеспечением производства и учетом расходуемых материалов.

Список литературы

1. Баженов, Ю.М. Способы определения состава бетона различных видов [Текст] / Ю.М. Баженов. – М.: Стройиздат, 1975. – 272 с.
2. Сизов, В.П. Проектирование составов тяжелого бетона [Текст] / В.П. Сизов. – М.: Стройиздат, 1980. – 144 с.
3. Дворкин, О.Л. Проектирование составов бетона. (Основы теории и методологии) [Текст] / О.Л. Дворкин. – Ровно: Изд-во УГУВХП, 2003. – 265 с.
4. ACI Manual of Concrete Practice, Part 1.-Detroit, 1980. – 150 p.
5. Дворкин, Л.И, Основы бетоноведения [Текст] / Л.И. Дворкин, О.Л. Дворкин. – С.Пб.: Строй-бетон, 2006. – 689 с.

Ключевые слова: состав бетона, прочность, морозостойкость, водонепроницаемость, усадка, водоцементное отношение.

Аннотации

У статті подано основні положення методології проектування складів бетону з комплексом необхідних властивостей (багатопараметричне проектування складів бетону). Показана можливість збільшення прогнозуючої здатності розрахункових залежностей, що зв'язують показники властивостей бетону з параметрами його складу, і спільного їх аналізу.

В статье приведены основные положения методологии проектирования составов бетона с комплексом требуемых свойств (многопараметрическое проектирование составов бетона). Показана возможность увеличения прогнозирующей способности расчетных зависимостей, связывающих показатели свойств бетона с параметрами его состава, и совместного их анализа.

In article the basic principles of methodology of concrete compositions design with the complex of the required properties (multiparametric design of concrete compositions) are resulted. Possibility of increase of forecasting ability of calculation dependences, which connected the indexes of properties of concrete with the parameters of it composition, and their joint analysis is shown.

УДК 666.972.5

Д-р техн. наук Н.М. Зайченко (ДонНАСА, г. Макеевка)

N.M. Zaichenko

КОМПЛЕКСНАЯ МОДИФИКАЦИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МИНЕРАЛЬНЫХ ВЯЖУЩИХ ВЕЩЕСТВ: ЭЛЕКТРОСТЕРИЧЕСКАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ ДИСПЕРСИЙ

COMPLEX MODIFICATION OF MICROSTRUCTURE OF COMPOSITE MATERIALS ON THE BASE OF MINERAL BINDINGS: ELECTROSTERIC STABILIZATION OF MINERAL DISPERSIONS

Постановка проблемы, анализ последних исследований и публикаций. При формировании композиционных строительных материалов из смесей, содержащих дисперсные частицы, необходима, с одной стороны, достаточная текучесть пасты, а с другой – требуемая когезия смеси для предотвращения

расслоения смеси и седиментации крупного заполнителя. Эти два требования противоречивы, очевидна задача достижения оптимального баланса между отталкиванием и притяжением частиц [1, 2].

Между дисперсными частицами могут действовать различные по своей природе силы отталкивания и притяжения,

среди которых И.Ф. Ефремов выделяет следующие [3]:

- электроповерхностные равновесные силы отталкивания;
- электроповерхностные неравновесные силы;
- силы взаимодействия микрообъектов, обладающих постоянным электрическим дипольным моментом;
- силы взаимодействия магнитных дисперсных частиц;
- молекулярные силы притяжения Ван-дер-Ваальса-Лондона;
- силы сопротивления жидких слоев, разделяющих взаимодействующие поверхности;
- капиллярные силы;
- гравитационные и центробежные силы;
- силы теплового (броуновского) движения микрообъектов.

В процессе гидратации портландцемента дисперсная система насыщается частицами гидратов коллоидных размеров, которые совершают в системе хаотичное броуновское движение. При их соударении эти частицы сцепляются по наименее гидрофильным участкам своей поверхности, связывая последние в коагуляционную структуру [4-6]. Действие сил притяжения между отдельными атомами и молекулами приводит к появлению аналогичных сил между макротелами, поверхности которых сближены до очень малых расстояний. Из условия существования сильных дальнедействующих сил притяжения между коллоидными частичками следует, что для стабилизации системы необходимо обеспечить дальнедействующее отталкивание между частичками. Принципиальная трудность заключается в необходимости свести масштаб действия сил отталкивания к масштабу действия сил притяжения (~5-10 нм). Этому требованию отвечает кулоновское отталкивание, которое является дальнедействующим по природе и может обеспечить

электростатическую стабилизацию дисперсий в результате взаимного отталкивания двойных электрических слоев [7], т.е. для стабилизации дисперсии необходима обработка поверхности частиц таким образом, чтобы исключить их непосредственное контактирование.

Согласно теории ДЛФО (Дерягин-Ландау-Verway-Overbeek) явление "флокуляция-диспергирование" частиц определяется величиной и положением потенциального барьера отталкивания - для частиц одинакового размера и знака заряда поверхности, хотя в реальной системе имеет место наличие гетероконтактов [6]. Потенциальная энергия взаимодействия двух частиц U_{DLFO} равна сумме энергий ван-дер-ваальсового притяжения U_{VDW} и электростатического отталкивания U_e :

$$U_{DLFO} = U_{VDW} + U_e. \quad (1)$$

Потенциальная энергия взаимодействия дисперсных частиц, обусловленная ван-дер-ваальсовыми силами, описывается выражением:

$$U_{VDW} = -\frac{Aa_1a_2}{6(a_1 + a_2)H_0}, \quad (2)$$

где A - константа Гамакера (для минеральных оксидов $A=1,7 \cdot 10^{-21}$ Джс); H_0 - минимальное расстояние между частицами, м; a_1 и a_2 - радиусы частиц, м; знак "-" указывает на притяжение частиц.

Потенциальная энергия электростатического взаимодействия между двумя заряженными частицами:

$$U_e = 2 \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot \chi \cdot \phi_s^2 \cdot e^{-\chi h}, \quad (3)$$

$$\chi = \sqrt{\frac{2F^2 \cdot J}{\epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot R \cdot T}}, \quad (4)$$

$$J = \frac{1}{2} \times \sum_i c_{0i} z_i^2, \quad (5)$$

где $\epsilon_0=8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая константа; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость дисперсионной среды; φ_δ – потенциал диффузного слоя, приравненный ζ -потенциалу, В; χ – величина, обратная толщине диффузного слоя; h – расстояние между частицами, м; $F=9,65 \cdot 10^4$ Кл/моль – число Фарадея; J – ионная сила раствора, моль/м³; c_{0i} и z_{0i} – концентрация, моль/м³, и заряд i -го иона.

Взаимодействие двойных электрических слоев оказывает влияние на процессы агрегации цементных частиц на ранней стадии твердения. Параметры двойного электрического слоя определяются потенциалом диффузного слоя φ_δ и ионной силой раствора. Величина φ_δ определяется, в свою очередь, природой минерала и величиной pH среды. Потенциал диффузного слоя (электрокинетический потенциал) вносит преобладающий вклад в энергию взаимодействия U_e [8].

Целью работы является установление влияния электроповерхностных свойств минеральных дисперсий на энергию парного взаимодействия частиц, а также адсорбцию добавок полиэлектролитов на поверхности частиц – электростатическую стабилизацию минеральных дисперсий.

Методики исследования.

Электрокинетический потенциал частиц определен по величине потенциала протекания [9] с помощью сконструированной установки, представленной на рис. 1, по формуле:

$$\zeta = \frac{\eta \chi U}{\epsilon \epsilon_0 \Delta p}, \text{ В}, \quad (6)$$

где η – вязкость раствора электролита (0,01М раствор KCl, $\eta=8,94 \cdot 10^{-4}$ Па·с при 298 К); U – измеряемый потенциал протекания, В; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость дисперсионной среды ($\epsilon=78,5$); Δp – перепад давления, Па; χ – удельная электропроводность протекающего раствора ($\chi=0,141$ См·м⁻¹).

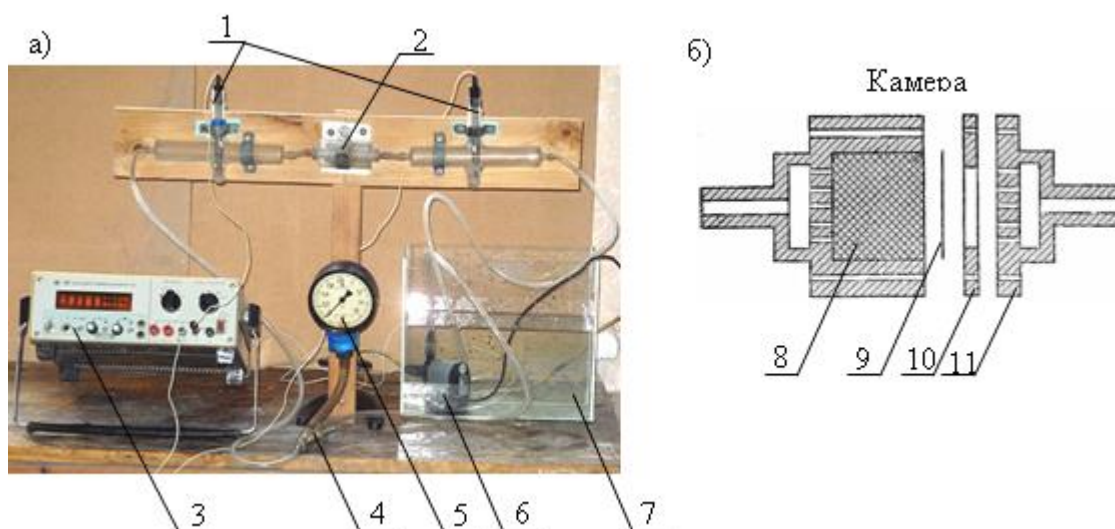


Рис. 1. Установка для измерения потенциала протекания (ζ -потенциала) дисперсных материалов (а) и схема камеры (б):

- 1 – хлорсеребряные электроды; 2 – камера; 3 – милливольтметр; 4 – кран; 5 – манометр; 6 – мининасос; 7 – емкость с раствором KCl; 8 – исследуемый материал; 9 – фильтровальная бумага; 10 – прокладка; 11 – крышка камеры

Расчет потенциальной энергии парного взаимодействия двух частиц выполнен с помощью компьютерной программы "Potential" (рис. 2) с учетом следующих условий – взаимодействие

частиц в растворе фонового электролита KCl ($C=0,01M$, $J=10$ моль/м³), температура 20°C, размер частиц портландцемента и золы-уноса 1 мкм, микрокремнезема – 0,1 мкм.

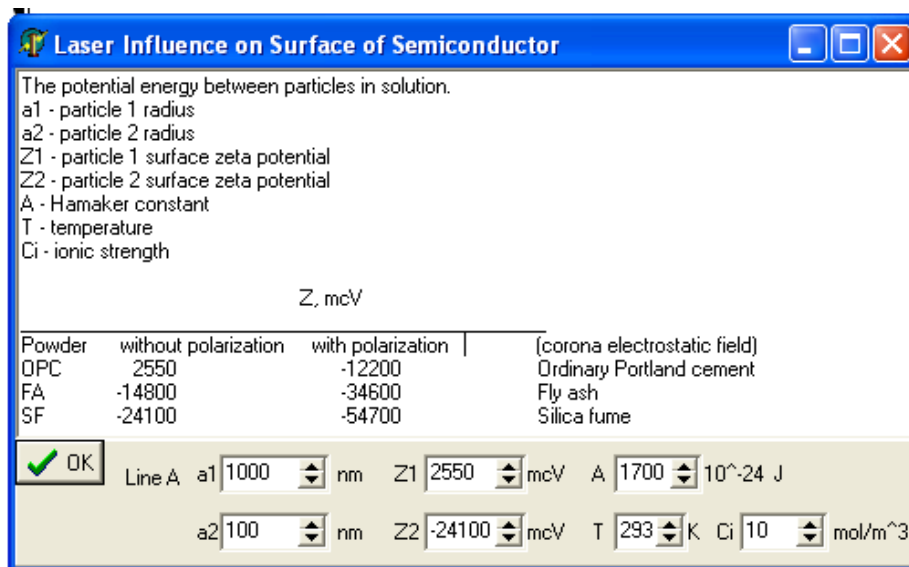


Рис. 2. Расчет потенциальной энергии парного взаимодействия двух частиц с помощью компьютерной программы "Potential"

Количество анионного полиэлектролита (суперпластификаторы С-3, FM-794), адсорбируемого из раствора поверхностью твердого тела, измерено по разности концентраций растворенного вещества до начала и после проведения адсорбции по данным спектрофотометрии (СФ-26).

Результаты экспериментов и обсуждение. Значения показателя электрокинетического потенциала для различных дисперсных минеральных материалов представлены в таблице. Установлено, что интегральный знак заряда портландцемента (ПЦ-I 42,5 N, "Балцем") положительный, в то время как зола-унос ТЭС и кремнеземистая пыль (микрокремнезем) имеют отрицательный заряд. При обработке дисперсных материалов в поле коронного разряда при отрицательной полярности коронирующего электрода (-22 кВ) абсолютное значение электрокинетического потенциала

увеличивается, при этом знак заряда для всех материалов – отрицательный.

Расчеты показывают, что в случае взаимодействия двух частиц портландцемента потенциальная энергия на всем участке их расстояния между собой является отрицательной, т. е. в системе будет преобладать притяжение, обуславливающее флокуляцию частиц и потерю агрегативной устойчивости цементной пасты. Для систем с отрицательно заряженными частицами золы-уноса и микрокремнезема преобладает отталкивание, а энергия потенциального барьера составляет соответственно 35 и 100 kT (рис. 3). Д.Н. Наррег отмечает [7], что если высота первичного максимума достаточна велика (больше или равна 24 kT), то скорость коагуляции частичек становится такой медленной, что система проявляет длительную стабильность.

Показатели электрокинетического потенциала дисперсных минеральных материалов

Наименование материала	Значение электрокинетического потенциала, мВ:	
	исходный материал	обработка в поле коронного разряда (-22 кВ)
Портландцемент	+2,55	-12,2
Зола-унос ТЭС	-14,8	-34,6
Микрокремнезем	-24,1	-54,7

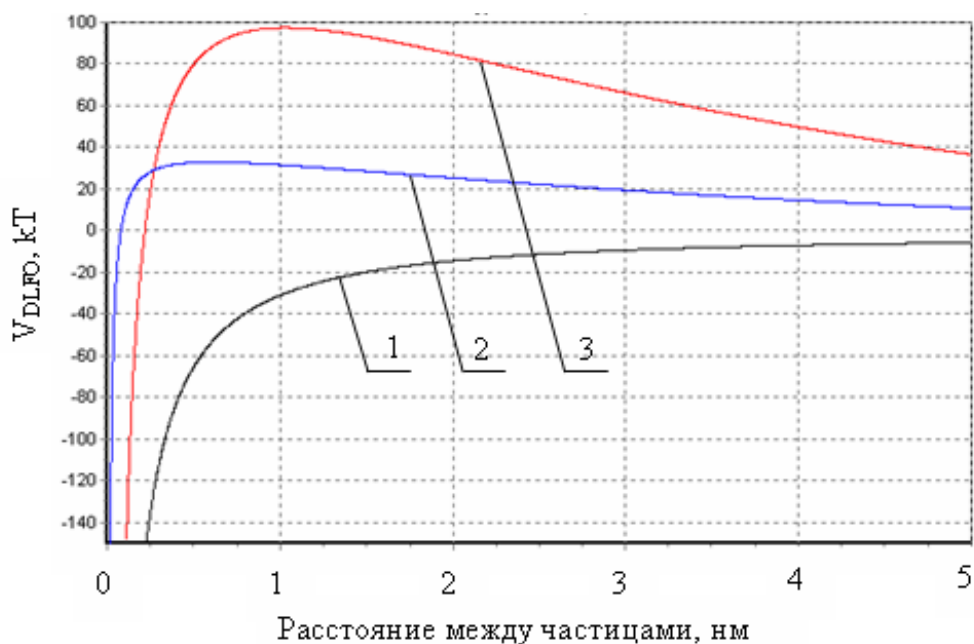


Рис. 3. Потенциальная энергия взаимодействия между дисперсными частицами в растворе фоновго электролита KCl ($C=0,01M$, $J=10$ моль/м³):

- 1 – портландцемент ($a_1=1$ мкм, $\zeta=+2,55$ мВ) – портландцемент ($a_2=1$ мкм, $\zeta=+2,55$ мВ);
- 2 – зола-унос ($a_1=1$ мкм, $\zeta=-14,8$ мВ) – зола-унос ($a_2=1$ мкм, $\zeta=-14,8$ мВ);
- 3 – микрокремнезем ($a_1=0,1$ мкм, $\zeta=-24,1$ мВ) – микрокремнезем ($a_2=0,1$ мкм, $\zeta=-24,1$ мВ)

После обработки дисперсных материалов в поле коронного разряда с отрицательным коронирующим электродом отмечен рост абсолютных значений ζ -потенциала, в результате во всех исследуемых системах преобладает электростатическое отталкивание, а величина энергии потенциального барьера для частиц микрокремнезема достигает очень высокого значения $750 kT$ (рис. 4).

В случае, когда взаимодействуют разнородные частицы с различным электроповерхностным потенциалом и

размерами, энергия взаимодействия для всех парных сочетаний частиц становится отрицательной, что указывает на образование гетероконтактов и флокуляцию частиц в дисперсных системах. При этом минимальная потенциальная энергия парного взаимодействия имеет место при контакте положительно заряженной дисперсной частицы портландцемента с отрицательно заряженной ультрадисперсной частицей микрокремнезема (рис. 5). В то же время, когда взаимодействуют частицы,

обработанные в поле коронного разряда, потенциальная энергия увеличивается, и в системах преобладает отталкивание (рис. 6). При этом максимальный эффект электростатической стабилизации отмечен для системы "портландцемент – микро-

кремнезем". Обращает внимание также факт, что высота потенциального барьера при взаимодействии частиц "портландцемент – портландцемент" ($\zeta = -12,2$ мВ) выше, чем при контакте частиц "портландцемент ($\zeta = -12,2$ мВ) – зола-унос" ($\zeta = -34,6$ мВ).

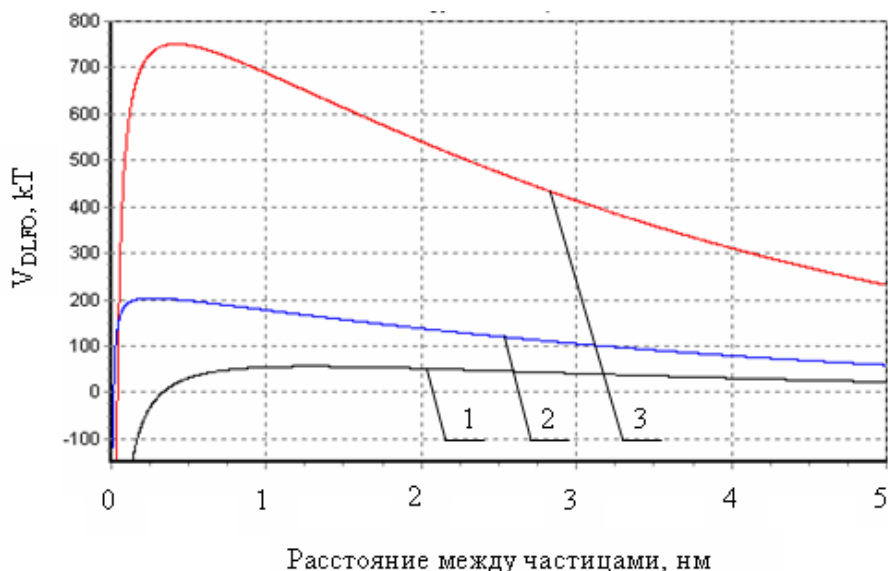


Рис. 4. Потенциальная энергия взаимодействия между дисперсными частицами в растворе фоновго электролита KCl ($C=0,01M$, $J=10$ моль/м³):

- 1 – портландцемент ($a_1=1$ мкм, $\zeta=-12,7$ мВ) – портландцемент ($a_2=1$ мкм, $\zeta=-12,7$ мВ);
- 2 – зола-унос ($a_1=1$ мкм, $\zeta=-34,6$ мВ) – зола-унос ($a_2=1$ мкм, $\zeta=-34,6$ мВ);
- 3 – микрокремнезем ($a_1=0,1$ мкм, $\zeta=-54,7$ мВ) – микрокремнезем ($a_2=0,1$ мкм, $\zeta=-54,7$ мВ)

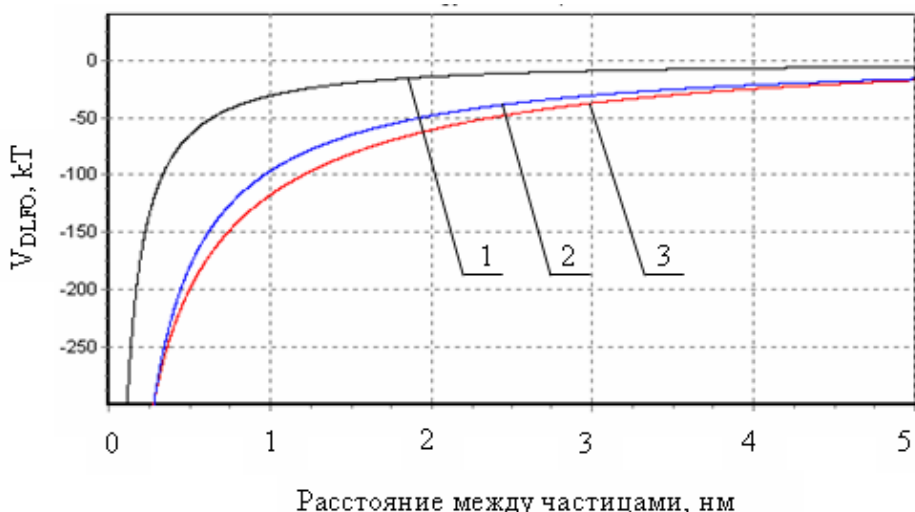


Рис. 5. Потенциальная энергия взаимодействия между дисперсными частицами в растворе фоновго электролита KCl ($C=0,01M$, $J=10$ моль/м³):

- 1 – портландцемент ($a_1=1$ мкм, $\zeta=+2,55$ мВ) – портландцемент ($a_2=1$ мкм, $\zeta=+2,55$ мВ);
- 2 – портландцемент ($a_1=1$ мкм, $\zeta=+2,55$ мВ) – зола-унос ($a_2=1$ мкм, $\zeta=-14,8$ мВ);
- 3 – портландцемент ($a_1=1$ мкм, $\zeta=+2,55$ мВ) – микрокремнезем ($a_2=0,1$ мкм, $\zeta=-24,1$ мВ)

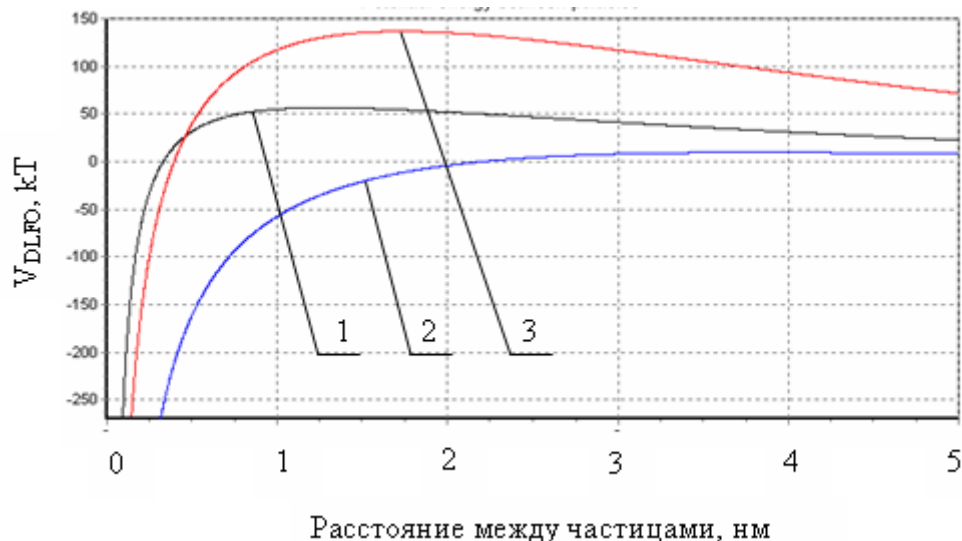


Рис. 6. Потенциальная энергия взаимодействия между дисперсными частицами в растворе фоновго электролита KCl ($C=0,01M$, $J=10$ моль/м³):

- 1 – портландцемент ($a_1=1$ мкм, $\zeta=-12,2$ мВ) – портландцемент ($a_2=1$ мкм, $\zeta=-12,2$ мВ);
- 2 – портландцемент ($a_1=1$ мкм, $\zeta=-12,2$ мВ) – зола-унос ($a_2=1$ мкм, $\zeta=-34,6$ мВ);
- 3 – портландцемент ($a_1=1$ мкм, $\zeta=-12,2$ мВ) – микрокремнезем ($a_2=0,1$ мкм, $\zeta=-54,7$ мВ)

По мнению Б.В. Дерягина [10], в случае постоянства поверхностных потенциалов при сближении частиц появляется электростатический барьер, высота которого определяется потенциалом менее заряженной частицы, а положение максимума – потенциалом более заряженной частицы. В то же время А. Бирманом высказано предположение, что потенциалы и заряды частиц являются функцией расстояния между ними [11]. Автор полагает, что для разнородных одноименно заряженных частиц на малых расстояниях может существовать электростатическое притяжение. Это объясняется перезарядкой менее заряженной частицы с изменением знака поверхностного заряда на противоположный.

Резюмируя вышеприведенные результаты расчетов, следует отметить, что, несмотря на достаточно значительный рост высоты потенциального барьера отталкивания между дисперсными частицами, обработанными в высоковольтном поле коронного разряда, вряд ли стоит ожидать сильного

реологического эффекта в дисперсных системах на основе таких частиц. Так, А.И. Вовк, проанализировав большое количество работ по установлению механизма пластификации цементных систем химическими добавками, отмечает, что некоторые традиционные ПАВ типа алкилсульфатов, алкилсульфонатов и др. снижают ζ -потенциал цементных систем до -20 мВ, однако при этом "...ни в коей мере не являются эффективными пластификаторами" [12].

С другой стороны, ранее установлено [13], что электростатическая поляризация портландцемента стимулирует его гидратацию, повышает растворимость. В свою очередь, эти процессы вызывают повышение ионной силы раствора (концентрация ионов в системе "цемент – вода" достигает своего максимума примерно через 30 минут после затворения цемента водой [8]), что приведет к рефлокуляции частиц вследствие сжатия ДЭС и усиления ван-дер-ваальсового взаимодействия [1]. Это связано с тем, что пространственная протяженность

("толщина") ДЭС зависит от ионной силы дисперсионной среды и обычно характеризуется дебаевской длиной ($1/\chi$). Рост ионной силы существенно уменьшает толщину ДЭС – при значениях ионной силы, превышающих 10^{-1} М, толщина ДЭС менее 1 нм. В этом случае масштаб действия электростатического отталкивания недостаточен, чтобы сбалансировать ван-дер-ваальсовое притяжение, и дисперсная система коагулирует [14].

На рис. 7 приведены результаты расчета энергии парного взаимодействия частиц, аналогично данным, приведенным

на рис. 6, однако при повышенной ионной силе раствора $J=200$ моль/м³. В этом случае уже на расстоянии свыше 2 нм для всех систем преобладающим во взаимодействии частиц является молекулярное притяжение.

R.J. Flatt и др. [15] отмечают, что для повышения агрегативной устойчивости цементных паст необходима электростерическая стабилизация – комбинация электростатического отталкивания ДЭС и стерического барьера, который предотвращает коагуляцию частиц при повышении ионной силы раствора цементной пасты свыше 100 моль/м³.

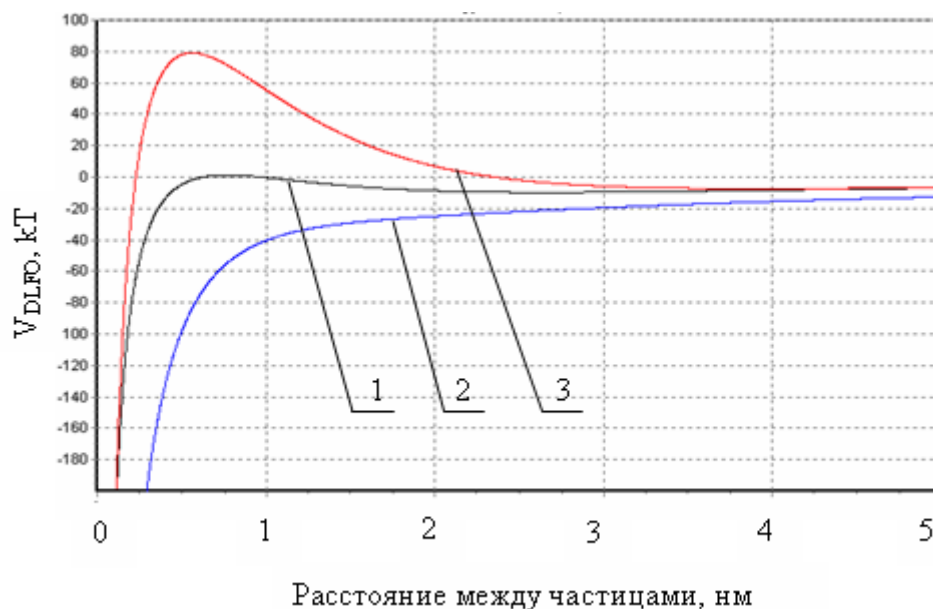


Рис. 7. Потенциальная энергия взаимодействия между дисперсными частицами в растворе фоновго электролита KCl ($C=0,2M$, $J=200$ моль/м³):

- 1 – портландцемент ($a_1=1$ мкм, $\zeta=-12,2$ мВ) – портландцемент ($a_2=1$ мкм, $\zeta=-12,2$ мВ);
- 2 – портландцемент ($a_1=1$ мкм, $\zeta=-12,2$ мВ) – зола-унос ($a_2=1$ мкм, $\zeta=-34,6$ мВ);
- 3 – портландцемент ($a_1=1$ мкм, $\zeta=-12,2$ мВ) – микрокремнезем ($a_2=0,1$ мкм, $\zeta=-54,7$ мВ)

Стерическая стабилизация достигается присоединением к поверхности слоя гибких макромолекул полимера, так называемой "полимерной щетки". Когда частицы притягивают одна другую, сжатие их полимерных покрытий приводит к упругому отталкиванию, что предохраняет от контактирования. При этом упругость полимера является энтропийной

величиной. В случае, когда пространство, содержащее гибкие полимерные молекулы, уменьшается при сжатии – число доступных конформаций снижается, проявляющееся в термодинамически не выгодном снижении энтропии [6].

Стабилизирующее или флокулирующее действие полимеров непосредственно связано с их адсорбцией на поверхности

дисперсной фазы [14]. Исходя из электрической природы центров адсорбции, можно предположить, что обработка минеральных дисперсных частиц в высоковольтном электрическом поле будет оказывать существенное влияние на их адсорбционную способность, так как адсорбция коллоидных частиц определенного знака соответствует "электрической карте" поверхности [16]. Таким образом, изменение спектра и концентрации поверхностных центров адсорбции может являться одним из ключевых факторов регулирования величины адсорбции полиэлектролитов (суперпластификаторов) на поверхности вяжущего и минеральных добавок.

Установлено [17], что количество адсорбированного суперпластификатора в форме анионного полиэлектролита в значительной мере зависит от наличия положительного заряда поверхности частиц. Обработка минеральных порошков в высоковольтном электростатическом поле коронного разряда, приводящая к повышению положительного заряда поверхности, обеспечивает увеличение величины адсорбции анионных добавок-пластификаторов и наоборот.

Выводы. Из условия существования сильных дальнедействующих сил притяжения между коллоидными частицами следует, что для стабилизации дисперсной системы необходимо масштаб

действия сил отталкивания свести к масштабу действия сил притяжения (~5-10 нм). Обработка минеральных дисперсий в высоковольтном электрическом поле обеспечивает электростатическую стабилизацию систем вследствие взаимного отталкивания двойных электрических слоев. Расчеты потенциальной энергии взаимодействия двух частиц показывают, что при повышении ионной силы поровой жидкости существенно уменьшается толщина ДЭС (при значениях ионной силы, превышающих 10^{-1} М, толщина ДЭС меньше 1 нм). В этом случае масштаб действия электростатического отталкивания недостаточен, чтобы сбалансировать ван-дер-ваальсовое притяжение. Для повышения агрегативной устойчивости цементных паст необходима электростатическая стабилизация – комбинация электростатического отталкивания ДЭС и стерического барьера, достигаемого присоединением к поверхности частиц гибких макромолекул анионного полиэлектролита (суперпластификатора). При этом регулировать величину адсорбции суперпластификатора на поверхности частиц портландцемента и минеральных добавок можно с помощью предварительной обработки дисперсных материалов в электрическом поле коронного разряда.

Список литературы

1. Kong, H.J. Effects of a strong polyelectrolyte on the rheological properties of concentrated cementitious suspensions [Text] / H.J. Kong, S.G. Bike, V.C. Li // Cem. Concr. Res. – 2006. – Vol. 36, No 5. – P. 851-857.
2. Phan, T.H. Influence of organic admixtures on the rheological behavior of cement pastes / T.H. Phan, M. Chaouche, M. Moranville [Text] // Cem. Concr. Res. – 2006. – Vol. 36, No 10. – P. 1807-1813.
3. Ефремов, И.Ф. Периодические коллоидные структуры [Текст] / И.Ф. Ефремов. – Л.: Химия, 1971. – 191 с.
4. Выродов, И.П. О некоторых вопросах физико-химии гетерогенных систем применительно к минеральным вяжущим веществам [Текст]: дис. ... д-ра хим. наук / И.П. Выродов. – Краснодар, 1963. – 333 с.

5. Дибров, Г.Д. Молекулярно-поверхностные явления в дисперсных структурах, деформируемых в активных средах [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.05 / Г.Д. Дибров. – Ростов-на-Дону, 1970. – 427 с.
6. Pusey, P.N. Colloidal Systems: Ordered. – Encyclopedia of Materials: Science and Technology. – Elsevier Science Ltd, 2001. – P. 1319-1329.
7. Неппер Д. Стабилизация коллоидных дисперсий полимерами [Текст]: пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 487 с.
8. Соломатов, В.И. О силах взаимодействия в дисперсной цементной системе [Текст] / В.И. Соломатов, В.В. Бредихин // Изв. вузов "Строительство". – 1996. – № 3. – С. 49-52.
9. Практикум и задачник по коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы [Текст]: учеб. пособие для вузов / В.В. Назаров, А.С. Гродский, А.Ф. Моргунов и др.; под ред. В.В. Назарова, А.С. Гродского. – М.: ИКЦ "Академкнига", 2007. – 376 с.
10. Дерягин, Б.В. Адгезия твердых тел [Текст] / Б.В. Дерягин, Н.А. Кротова, В.П. Смилга. – М.: Наука, 1973. – 280 с.
11. Bierman, A. Electrostatic forces between monidentical colloidal particles // J. of Colloid and Inter. Sci. – 1955. – Vol. 10, No 3. – P. 143-148.
12. Вовк, А.И. Современные представления о механизме пластификации цементных систем [Текст] / А.И. Вовк // Мат-лы II Всероссийской конф. по бетону и железобетону. – М., 2005. – С. 740-753.
13. Matviyenko, V.A. Hardening of Cements, Polarized in Electric Field / V.A. Matviyenko, N.M. Zaitchenko // 10-th International Congress on the Chemistry of Cement, 2-6 June 1997: Proc. – Gothenburg (Sweden), 1997. – Vol. 2. – 2ii076. – 4 pp.
14. Баран, А.А. Электроповерхностные явления и устойчивость полимерсодержащих дисперсных систем [Текст]: дис. ... д-ра хим. наук: 02.00.11 / А.А. Баран. – К., 1980. – 476 с.
15. Flatt, R.J. The rheology of cementitious materials / R.J. Flatt, N.S. Martys, L. Bergström // MRS Bulletin. – 2004. – Vol. 29, No 5. – P. 314-318.
16. Челидзе, Т.Л. Электрическая спектроскопия гетерогенных систем [Текст] / Т.Л. Челидзе, А.И. Деревянко, О.Д. Куриленко. – К.: Наук. думка, 1977. – 231 с.
17. Зайченко, Н.М. Высокопрочные тонкозернистые бетоны с комплексно модифицированной микроструктурой [Текст]: монография / Н.М. Зайченко. – Макеевка: ДонНАСА, 2009. – 207 с.

Ключевые слова: минеральное вяжущее, композиционный материал; высоковольтное электрическое поле, микроструктура.

Аннотации

Досліджено вплив обробки дисперсних мінеральних частинок портландцементу, золи-виноса та мікрокремнезему в електричному полі коронного розряду на величину електрокінетичного потенціалу. Виходячи з одержаних результатів, з використанням комп'ютерної програми "Potential" виконано розрахунок потенційної енергії парної взаємодії дисперсних частинок. Показано, що підвищення негативного значення ξ -потенціалу забезпечує електростатичну стабілізацію дисперсної системи. В той же час, в процесі гідратації в'язучого при підвищенні іонної сили порової рідини суттєво зменшується товщина ПЕШ. В цьому випадку масштаб дії електростатичного відштовхування є недостатнім, щоб збалансувати ван-дер-ваальсове тяжіння.

Исследовано влияние обработки дисперсных минеральных частиц портландцемента, золы-уноса и микрокремнезема в электрическом поле коронного разряда на величину

электрокинетического потенциала. Исходя из полученных данных, с помощью компьютерной программы "Potential" выполнен расчет потенциальной энергии парного взаимодействия дисперсных частиц. Показано, что повышение отрицательного значения ζ -потенциала обеспечивает электростатическую стабилизацию дисперсной системы. В то же время, в процессе гидратации вяжущего при повышении ионной силы поровой жидкости существенно уменьшается толщина ДЭС. В этом случае масштаб действия электростатического отталкивания недостаточен, чтобы сбалансировать ван-дер-ваальсовое притяжение.

The effect of treatment of dispersed mineral particles of Portland cement, fly ash and silica fume in the electric field of corona discharge on the value of zeta potential has been investigated. Based on the data obtained by a computer program "Potential" the calculation of the potential energy of the pair interaction of dispersed particles was done. It is shown that an increase of the negative value of zeta potential provides the electrostatic stabilization of the dispersed system. At the same time, increasing ionic strength of the pore fluid during hydration of the binder substantially reduces the thickness of Double Electric Layer. In this case, the scale of the action of the electrostatic repulsion is not sufficient to balance the van der Waals attraction.

УДК 691.328.5

*Канд. хим. наук А.С. Кагановский («АСМ Management»),
О.В. Градобоев (ОАО «БШК»),
канд. техн. наук Ал.А. Плугин (УкрГАЗТ)*

A.S.Kaganovsky, O.V.Gradoboev, Al.A. Plugin

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ МИНЕРАЛЬНЫХ И СИНТЕТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН: ПРОБЛЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА ХРИЗОТИЛ-ЦЕМЕНТА

HIGH EFFICIENCY COMPOSITE MATERIALS BASED ON MINERAL AND SYNTHETIC FIBERS: PRODUCTION PROBLEMS OF CHRYSOTILE CEMENT

Представила д-р техн. наук, профессор Г.Н. Шабанова

Актуальность темы. Хризотил-цемент по-прежнему является самым недорогим на рынке твердым кровельным строительным материалом. Данный материал обладает множеством положительных свойств, таких как высокая долговечность, прочность, огнестойкость, низкая теплопроводность. Всё это обуславливает высокий спрос на асбестоцемент. Однако последние 20-30 лет

популярность асбестоцемента стремительно снижалась. Это обусловлено появлением на рынке большого количества конкурентных кровельных материалов, таких как битумно-волоконистые, волокнисто-цементные, металлические и т.д. Однако, главным образом, снижение спроса на хризотил-цемент во всем мире связано с «антиасбестовой кампанией», организованной производителями

синтетического волокна и кровельных материалов на его основе. Данная проблема является наиболее существенной в отрасли не только в Украине, а и во всем мире.

Исследованиям безопасности использования хризотил-асбеста посвящено множество научных трудов. В Канаде, России, Украине и других странах были созданы специальные некоммерческие организации – «Хризотилевые ассоциации», предназначенные для координации исследований в области безопасности хризотил-асбеста. Множество медицинских исследований, обобщенных в [1, 2], показывают, что хризотил обладает существенно более низкими болезнетворными свойствами, чем амфибол (амозит, крокодилит) и многие другие используемые в производстве строительных материалов волокна (целлюлозные, керамические, параразмидные, стеклянные, минеральные и др.). Данные С.М. Нейман [1] доказывают, что эмиссии волокна хризотил-асбеста с поверхности хризотил-цемента не происходит. Всё это дает основание заключить, что использование изделий из хризотил-цемента является практически безопасным. Поэтому авторами намеренно

используются термины «хризотил» и «хризотил-цемент», подчеркивающие факт использования именно хризотилового асбеста.

Особенности технологии производства хризотил-цемента и свойства хризотила. Производство хризотил-цемента уже более 100 лет осуществляется по технологической схеме, разработанной Людвигом Гатчеком (Ludwig Hatschek, рис. 1). В 1900 г. Л. Гатчек получил патент № 5970 Австро-Венгерской Империи на новый способ производства строительных материалов «Процесс производства плит из искусственного камня с гидравлическими вяжущими веществами с применением волокнистых материалов» [3]. Данные плиты автор патента назвал «eternit», что в переводе с латинского обозначает «вечный». Данным способом кроме асбестоцемента производятся и другие волокнисто-цементные кровельные материалы, часто называемые фиброцементом, а также картон. В настоящее время данный способ производства достаточно широко используется и более известен как способ послойного формования.



Рис. 1. Изобретатель способа производства хризотил-цемента Людвиг Гатчек (Ludwig Hatschek, 1856-1914)

Обрані праці 4-ї Міжнародної науково-технічної конференції

Однако на протяжении многих лет учеными и конструкторами из разных стран разрабатывались новые способы формования фиброцементных материалов. Так, например, ещё в 1960-х гг.

итальянскими специалистами фирмы ISPRA была усовершенствована технология производства и получены сверхпрочные хризотил-цементные материалы (рис. 2).

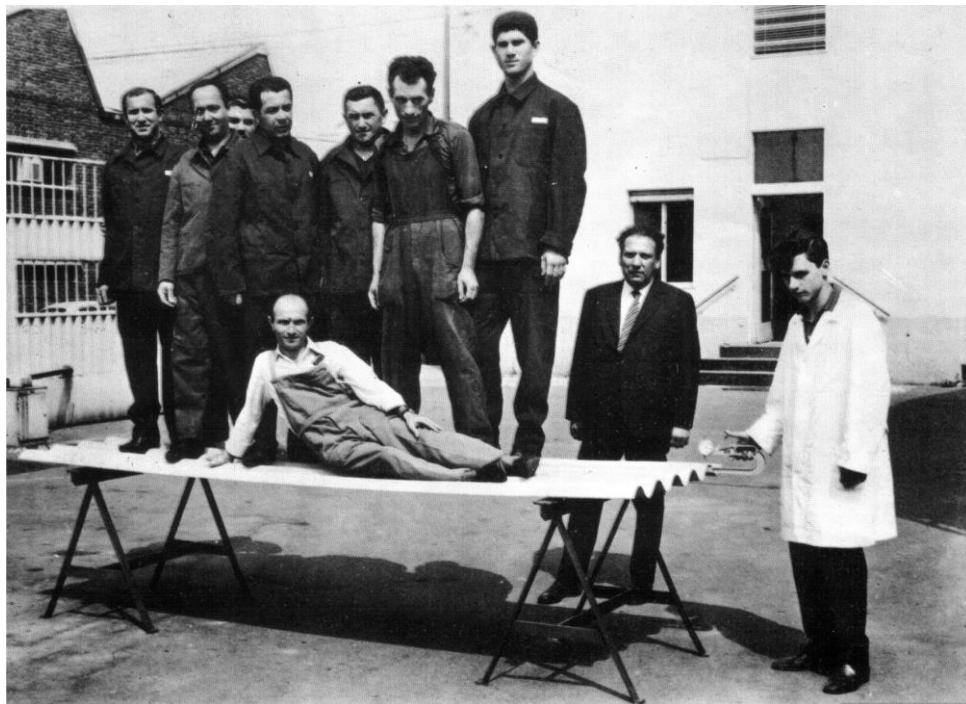


Рис. 2. Сверхпрочный асбестоцементный волнистый лист VULKANIT фирмы ISPRA (Милан, Италия, 1963 г.)

В целом технологию производства асбестоцемента способом послойного формования можно охарактеризовать как технологию с достаточно большим количеством технологических требований, предъявляемых к свойствам как

компонентов, так и цементно-водной суспензии. Важнейшие свойства хризотила, определяющие его пригодность для производства хризотил-цемента, представлены в таблице [4, 5, 6].

Таблица

Основные свойства хризотила

Физико-механические	Физико-химические	Технологические
Структура волокна	Удельная поверхность	Распушиваемость
Модуль упругости и прочность при растяжении	Поверхностные свойства (электрокинетический потенциал)	Фильтрационные свойства асбестовых суспензий
Агрегативная связность, гибкость и морфология	Адсорбция	Цементоудерживающая способность
Эластичность волокна асбеста	Химическая стойкость	Водоудерживающая способность
Сопротивление сдвигу	—	Компрессионные свойства
—	—	Армирующие свойства волокон

Кроме того, на указанные свойства влияют следующие факторы:

- месторождение (на различных месторождениях свойства хризотила могут существенно отличаться);

- способ залегания хризотила (за пределами зоны выветривания, в зоне выветривания);

- процесс обогащения хризотила (качество обогащения).

Использование хризотила различных месторождений. В советское время предприятия-производители асбестоцемента, как правило, получали хризотил из одних и тех же месторождений, а цемент с одних и тех же заводов. Качество сырья было относительно стабильным, а разработкой рецептур занимался единственный в СССР научно-исследовательский институт ВНИИпроектасбестцемент. В настоящее время институт прекратил своё существование, а его сотрудники давно достигли пенсионного возраста. Таким образом, асбестоцементные заводы остались неспособными решать сложные оптимизационные задачи на своих предприятиях. Постоянное изменение цен и качества компонентов хризотил-цемента заставляет предприятия заниматься поиском наиболее привлекательных с точки зрения соотношения цена/качество производителей хризотила и цемента. Однако, как показали наши исследования, использование, например, хризотила различных месторождений требует иногда серьезных изменений технологического процесса производства хризотил-цемента. Более того, использование хризотила нетрадиционных для отечественных заводов месторождений вызывает затруднения в связи с несоответствиями стандартов СНГ зарубежным стандартам. Так, например, в Канаде, Бразилии, Китае маркировка товарного хризотила отличается от маркировки стандартов СНГ. Отличаются также и лабораторные методы исследований свойств хризотила и методики составления рецептур хризотил-цемента.

Основным способом определения фракционного состава на отечественных заводах по-прежнему остается сухой способ на контрольном аппарате, в то время, как ещё в 1970-хх гг. ВНИИпроектасбестцементом было установлено, что данная методика может быть лишь оценочной (прикидочной) и не может являться базовой для составления смесок хризотила для хризотил-цемента.

ВНИИпроектасбестцементом была предложена методика составления смесок, основанная на результатах определения фракционного состава на гидрокласификаторе типа Бауэр-Мак-Нетта.

Зарубежные производители хризотил-цемента используют методику составления смесок хризотила, основанную на определении различных интегральных показателей, таких как технологическая ценность волокна (W_a), показатель прочности волокна (FSU), показатель качества фракционного состава (AGV). Определение фракционного состава осуществляется на гидрокласификаторе Тернер-Ньюалл, кроме того, определяется объём хризотила во влажном состоянии методом цилиндров с инвертером. Дополнительно проводится Wash Test (тест на промыв фракции менее 0,075 мм), определяется интегральный показатель – индекс Тернер-Ньюалл. Также определяется влажность хризотила, фракционный состав по классам распушенности на элютриаторе, удельная поверхность на приборе Рапид-Тестер, показатель FSU (Fiber Strength Unit) в единицах прочности асбестового волокна. Для определения показателя прочности асбестового волокна проводится испытание на изгиб асбестоцемента, содержащего исследуемое волокно, и рассчитывается уровень прочности материала (асбестоцементной плитки) относительно стандартной прочности волокна. Так определяется технологическая ценность волокна W_a . Считается, что асбестовое волокно дает стандартную прочность

100 ед. при стандартной плотности волокна, когда его количество в материале составляет 10 %. Количество хризотилового волокна, необходимого для изготовления асбестоцементного образца стандартной прочности, изменяется в зависимости от того, какими ценностью или армирующими свойствами оно обладает. Определив долю волокна, необходимую для получения асбестоцемента стандартной прочности, рассчитывают FSU – относительную прочность волокна:

$$FSU = \frac{1000}{F_n};$$

$$F_n = \frac{100 \times 275 \times F}{\sigma \times (100 - F) + 275 \times F},$$

$$AVG = 2,1 \cdot W_1 + 1,5 \cdot W_2 + 1 \cdot W_3 + 0,5 \cdot W_4 - 0,1 \cdot W_5,$$

где W_1 – массовая доля волокна длиной более 4 mesh (4,75 мм), W_2 – более 14 mesh (1,18 мм), W_3 – более 35 mesh (0,425 мм), W_4 – более 200 mesh (0,075 мм), W_5 – менее 200 mesh (0,075 мм).

Показатель AGV используется потребителями для составления и разработки смесок в асбестоцементной промышленности. Он является аналогом показателя L-характеристика, разработанном ВНИИпроектасбестцементом [7].

Выводы и рекомендации. Исходя из изложенного, обозначим проблемы производства хризотил-цемента в СНГ и Украине, в частности:

- высокое энергопотребление;
- низкая автоматизация производства;
- «антиасбестовая кампания»;
- отсутствие сырья в Украине;
- отсутствие оснащенных лабораторий

на предприятиях не только для осуществления инновационной деятельности, но и для обеспечения контроля качества сырья;

где F_n – расход хризотила в смеси, необходимый для получения стандартной прочности асбестоцемента, %; FSU – относительная прочность волокна, ед.; F – расход хризотила в смеси (10 %); σ – предел прочности исследуемого образца, кгс/см².

Технологическая ценность хризотилового волокна W_a измеряется в процентах (%) и определяется по формуле:

$$W_a = \frac{FSU - 10,3}{1,38}.$$

Затем определяется обобщающий показатель качества фракционного состава AGV (Average Grade Value):

- отсутствие квалифицированных кадров на асбестоцементных предприятиях, способных создавать инновации.

Перспективными направлениями развития производства асбестоцементных кровельных материалов авторы считают:

- разработку беспропарочной технологии производства хризотил-цемента;
- повышение декоративных свойств асбестоцемента путем применения современных методов окрашивания и тиснения хризотил-цемента;
- увеличение ассортимента выпускаемой продукции;
- создание универсальной, адаптированной к международным и отечественным требованиям, методики оценки пригодности хризотила различных месторождений в производстве хризотил-цемента;
- разработку безасбестовых рецептов (фиброцемент) или рецептов со сниженным содержанием хризотила;
- создание современной научно-исследовательской лаборатории для

осуществления инновационной и - создание систем статистической оптимизационной деятельности обработки данных испытаний на предприятиях; предприятия.

Список литературы

1. Нейман, С.М. О безопасности асбестоцементных материалов и изделий [Текст] / С.М. Нейман, А.И. Везенцев, С.В. Кашанский. – М.: РИФ «Стройматериалы», 2006. – 64 с.
2. Кочелаев, В.А. Ещё раз об асбесте и новейших международных медицинских исследованиях, связанных с ним [Текст] / В.А. Кочелаев // НО «Хризотилловая ассоциация». – Асбест, 2010. – 19 с.
3. Самоочищающийся японский фиброцементный сайдинг – рекламный трюк или нанотехнологии? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://red-fasad.ru/content/id90/>.
4. Берней, И.И. Технология асбестоцементных изделий [Текст] / И.И. Берней, В.М. Колбасов. – М.: Стройиздат, 1985. – 399 с.
5. Беркович, Т.М. Основы технологии асбестоцемента [Текст] / Т.М. Беркович. – М.: Стройиздат, 1979. – 233 с.
6. Соколов, П.Н. Технология асбестоцементных изделий [Текст] / П.Н. Соколов. – М.: Стройиздат, 1968. – 288 с.
7. Пуненков, С.Е. Современное состояние и перспектива развития хризотил-асбестовой отрасли в Бразилии [Текст] / С.Е. Пуненков // Строительные материалы. – 2011. – № 5. – С. 73-80.

Ключевые слова: хризотил, хризотил-цемент, асбест, асбестоцемент, синтетическое волокно.

Аннотации

У статті розглянуто сучасні проблеми азбестоцементної галузі в Україні. Надано короткий історичний нарис і характеристику технологічного процесу виробництва хризотил-цементу. Показані умови можливості застосування хризотилу різних родовищ на азбестоцементних підприємствах. Надані універсальні рекомендації щодо удосконалення процесу виробництва хризотил-цементу.

В статье представлены современные проблемы асбестоцементной отрасли в Украине. Дан краткий исторический очерк и характеристика технологического процесса производства хризотил-цемента. Представлены условия возможности применения хризотила различных месторождений на асбестоцементных предприятиях. Представлены универсальные рекомендации по усовершенствованию процесса производства хризотил-цемента.

The article presents the current problems of the asbestos and cement industry in Ukraine. It is given a brief historical sketch and description of the process of chrysotile-cement production. Presented conditions of possibility of using chrysotile of different deposits in the asbestos and cement enterprises. Presented universal recommendations for improving the process of production of chrysotile-cement.

УДК 691.32

*Інженери В.В. Перестюк, Т. Шуба, В. Чистяк
(Tines S.A., м. Краків, Польща),
д-р техн. наук А.А. Плуґін (УкрДАЗТ)*

*V.V. Perestiuk, T. Shuba, V.A. Chystiak,
A.A. Plugin*

ОГЛЯД КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТА УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ ПІДРЕЙКОВИХ ОСНОВ ЗАЛІЗНИЦЬ

OVERVIEW OF DESIGN FEATURES AND OPERATING CONDITIONS REINFORCED CONCRETE UNDER RAIL FOUNDATIONS RAILWAYS

Актуальність теми і постановка проблеми. На електрифікованих ділянках залізниць, у метрополітенах, трамвайних коліях, конструкції мостів, тунелів, підрейкових основ, інших конструкцій дуже інтенсивно пошкоджуються електрокорозією від дії струмів витоку та блукаючих струмів [1]. Під час руху поїздів виникають значна вібрація та шум. Згідно із сучасною тенденцією підвищення швидкості руху вібрація та шум також збільшуються. Вібрація та шум, як відомо, несприятливо впливають на людину, довкілля, будівельні конструкції та споруди. Отже, на сьогодні дуже актуально стоїть завдання зниження струмів витоку, шуму та вібрації, особливо у населених пунктах.

Електрокорозія, вібрація та шум у значній мірі обумовлені недосконалістю традиційної конструкції верхньої будови колії, яка складається із рейок та підрейкової основи (шпал, плит тощо). Такі конструкції, як правило, жорсткі, добре передають вібрацію та створюють шум, швидко втрачають електроізоляційні властивості. На сьогоднішній день на залізницях України і багатьох інших країн завершується заміна дерев'яних шпал, брусів, поперечин на залізобетонні підрейкові основи. Найбільш

розповсюдженою з таких основ, що застосовується на відкритих ділянках залізниць, на залізобетонних мостах, у тунелях, є залізобетонні шпали і бруси, які укладаються на щебеневий баласт [2]. Лише на металевих мостах як типова конструкція застосовується безбаластне мостове полотно із залізобетонних плит.

При всіх перевагах залізобетонних підрейкових основ над дерев'яними вони мають і недоліки, серед яких часто недостатні електричний опір і електрокорозійна стійкість [1], неприпустимі в населених пунктах шум та вібрація, які утворюються при проходженні поїздів [3]. Резерви удосконалення конструкції колії на залізобетонних шпалах і щебеному баласті практично вичерпані, отже, подальшого збільшення електричного опору і електрокорозійної стійкості, зниження шуму та вібрації доцільно досягати шляхом застосування та удосконалення інших конструкцій верхньої будови колії. Найбільш перспективною конструкцією для цього здається суцільна залізобетонна підрейкова основа, яка виконується блочною (збірною) або монолітною. Така конструкція може бути виконана практично повністю водонепроникною, а отже, чинити високий опір струмам витоку і бути

електрокорозійно стійкою, а також характеризується значними масою та інерцією, які сприяють гасінню шуму та вібрації.

Отже, аналіз конструктивних особливостей залізобетонних підрейкових основ залізниць з метою їх подальшого удосконалення, збільшення електричного опору та електрокорозійної стійкості і зниження шуму та вібрації є актуальним завданням.

Блочні (збірні) підрейкові основи. Перші конструкції колії на бетонній основі з'явилися на початку ХХ сторіччя. Перша колія без баластового шару і шпал

довжиною 98 м була побудована інженером Н.Є. Долговим у 1909 р. на ст. Пологи Придніпровської залізниці. У 1946 р. у ЦНІ МШС СРСР під керівництвом Б.І. Мушкатина і Є.М. Бромберга були створені і укладені на дослідних ділянках ще дві нові конструкції підрейкової основи. У 1956-59 рр. ЦНІ МШС СРСР і Гіпропромтрансбудом під керівництвом М.Ф. Вериги було розроблено десять варіантів конструкцій залізобетонних підрейкових основ, у т.ч. рамно-лежневі з довжиною лежня 4,16 м (рис. 1, а) і плитні з шириною плити 2,6 м і довжиною 6,24 м (рис. 1, б) [1].

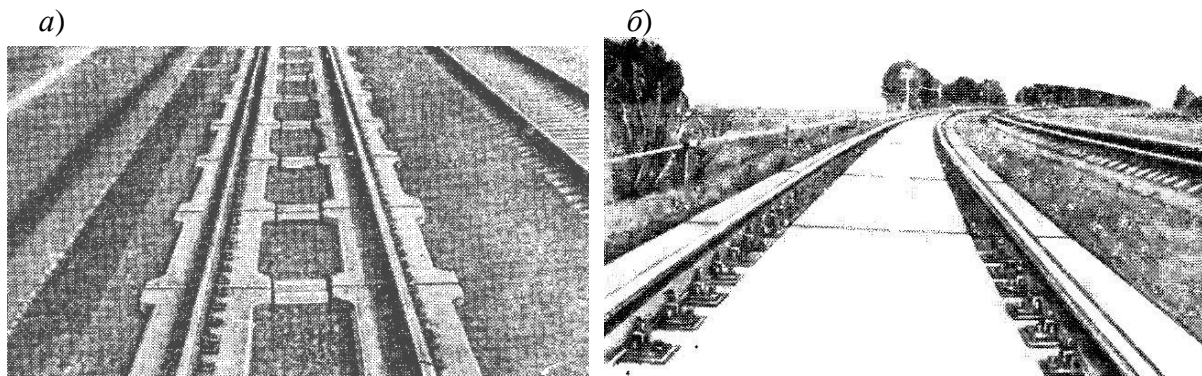


Рис. 1. Блочні підрейкові основи: а – рамно-лежневі; б – плитні

Основні переваги колії на блочній підрейковій основі над традиційною рейко-шпальною решіткою обумовлені створенням неперервної опорної площадки для рейкових ниток, що забезпечує високу стабільність рейкової колії як у горизонтальній, так і у вертикальній площинах, усуває нерівномірність деформацій по довжині й ширині колії, запобігає їх швидкому накопиченню, забезпечує зниження витрат на утримання і ремонт колії. На деяких ділянках колії, особливо на штучних спорудах – мостах, естакадах, тунелях, традиційна рейко-шпальна решітка виявилась недостатньо раціональною, бо нерівномірні деформації, які накопичуються у колії, у цих випадках мають особливо неприємні наслідки, а їх

усунення і ремонт пов'язані з підвищеними складностями внаслідок обмеженого простору і трудностю використання машин і механізмів. Сама ж конструкція штучних споруд забезпечує високу стабільність основи і робить доцільним застосування для колії блочних підрейкових основ.

Починаючи з 1940-50-х рр., блочні підрейкові основи як рамні, так і плитні пройшли широку експлуатаційну перевірку на залізницях Німеччини, Японії, Франції Чехії, Великобританії, СРСР та ін. Було встановлено, що накопичення остаточних деформацій колії у порівнянні із колією на залізобетонних шпалах зменшується у 2-3 рази. Суттєво спрощується виконання робіт із поточного утримання колії [1].

Однак рамно-лежневі підрейкові основи виявились менш досконалыми. Було встановлено, що тиск на основну площадку земляного полотна від них більш високий і нерівномірний, ніж навіть на колії із дерев'яними шпалами, а шарнірність рамно-лежневої конструкції не забезпечувала постійність ширини колії. Тому такі конструкції були визнані неперспективними.

Більш перспективними показали себе конструкції колії з плитними підрейковими основами. Вони виявилась більш надійними і такими, що забезпечують більшу стабільність колії в цілому. Саме плитні основи забезпечують найкращі умови відводу води від конструкції колії, запобігаючи замерзання води в баласті й явища здимання. Однак ці конструкції колії вимагають забезпечення певних достатньо жорстких умов як до якості самої конструкції, так і до її укладання та експлуатації.

Плити мають опиратися усією нижньою постіллю на підстилаючий шар, ущільнений настільки, щоб працювати лише в пружній стадії. Для найкращої роботи цього шару необхідно, щоб найбільший тиск від рухомого складу через плити передавався по можливості далі від периметра плит, бо опір підстилаючого шару біля країв плит значно менший, ніж під їх середньою частиною [1]. Опорні поверхні для рейок на кожній плиті мають бути строго на одному рівні для забезпечення однакової щільності обпирання рейки по її довжині, особливо при нинішньому способі обпирання рейок не безперервно по усій довжині на плиту, а на окремі опори через підкладки або прокладки з прогоном між ними (на вітчизняних конструкціях плит відстань між їх осями – 500 мм). Пружність рейкових скріплень повинна бути такою, щоб вона в основному гасила високочастотні вібрації і формувала пружність плитної підрейкової основи в

цілому, і щоб при динамічних взаємодіях рухомого складу і колії маса рейки була пружно віддалена від маси плити. Пружність підрейкової основи має бути не лише достатньою, але практично незмінною упродовж року, коливаючись у межах 50-100 МПа. Скріплення повинні забезпечувати постійність і однаковість натягування прикріплювачів для запобігання утворення різкої неоднорідності колії по її довжині, при якій можуть повністю зникнути усі переваги колії на плитній основі. Плитні підрейкові основи можна укласти лише на здорове земляне полотно. Товщина щебеневого шару під плитами має бути достатньою для виконання робіт із його підпресування з одночасною вібрацією, що створює найбільш щільне розміщення щебеню усередині шару [1].

Монолітні підрейкові основи.

Монолітна бетонна підрейкова основа вперше була укладена у 1926-29 рр. на залізниці Пер-Маркетт у США. Рейкова колія на монолітних основах застосовується, як правило, двох типів: 1 – повністю монолітна, на якій рейки укладаються безпосередньо на плиту, а між подошвою і бетоном укладаються пружні прокладки; 2 – збірно-монолітна, де у монолітну основу замуруюються шпали (або півшпали), на які встановлюються рейки на скріпленнях. Друга конструкція застосовується в тунелях, у першу чергу метрополітенів (рис. 2). На рис. 2, а показаний переріз двоколісного тунелю на ділянці Цюріх – Баден (Швейцарія). Рейки укладені на двоблочні залізобетонні шпали із металевим зв'язком між блоками. Блоки шпал розміщуються у гніздах залізобетонних плит 6, розташованих на тонкому шарі бетону 2. Для відведення води є центральний водовідвідний лоток 1 і бокові водовідвідні лотки 4, боковими стінками для яких служать стінки каналів 5 для укладання кабелів.

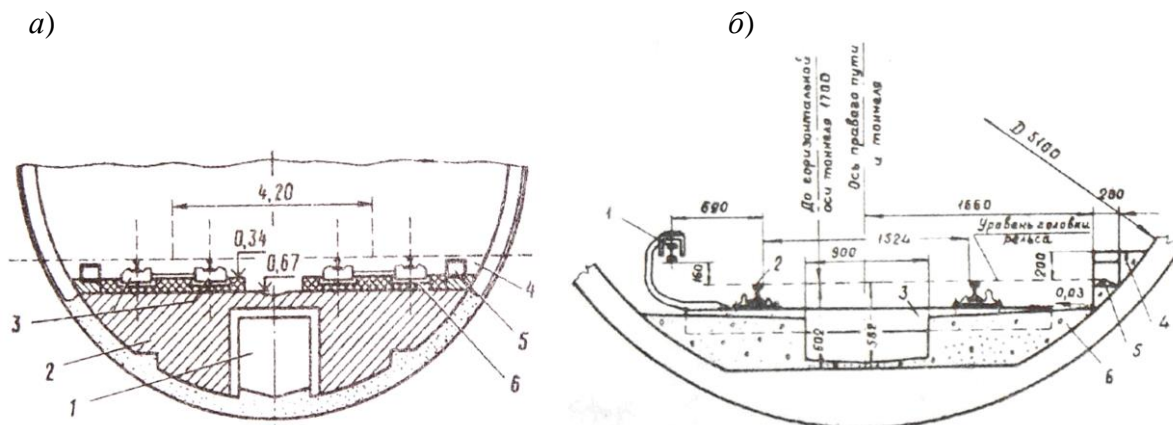


Рис. 2. Монолітні підрейкові основи [1]: *a* – залізничного тунелю на ділянці Цюрих – Баден (Швейцарія); *б* – тунелю метрополітену

У метрополітенах (рис. 2, *б*) залізнична колія є комбінованою з рейко-шпальною решіткою 2 і бетонною основою *б*, в яку замуrowані дерев'яні шпали 3 або півшпали (на станційних коліях). Відмінною особливістю улаштування колії в метрополітенах, яка може визначати електрокорозійну небезпеку, є наявність окрім колійних рейок 2 третьої (контактної) рейки 1, по якій для споживання двигунів вагонів подається електричний струм високої напруги [1].

Сучасні збірні і монолітні підрейкові основи, аналіз їх конструктивних особливостей та умов експлуатації. В результаті подальшого удосконалення монолітних збірних і монолітних конструкцій підрейкових основ у XXI ст. на закордонних залізницях, зокрема фірмою Tipes у Польщі, впроваджуються системи, наведені на рис. 3 [3]. Їх особливістю є ізоляція рейки (рис. 3, *a*) або підрейкової блочної опори (рис. 3, *б*) за допомогою вібро- та електроізоляційних прокладок – знизу та мастики – з боків.

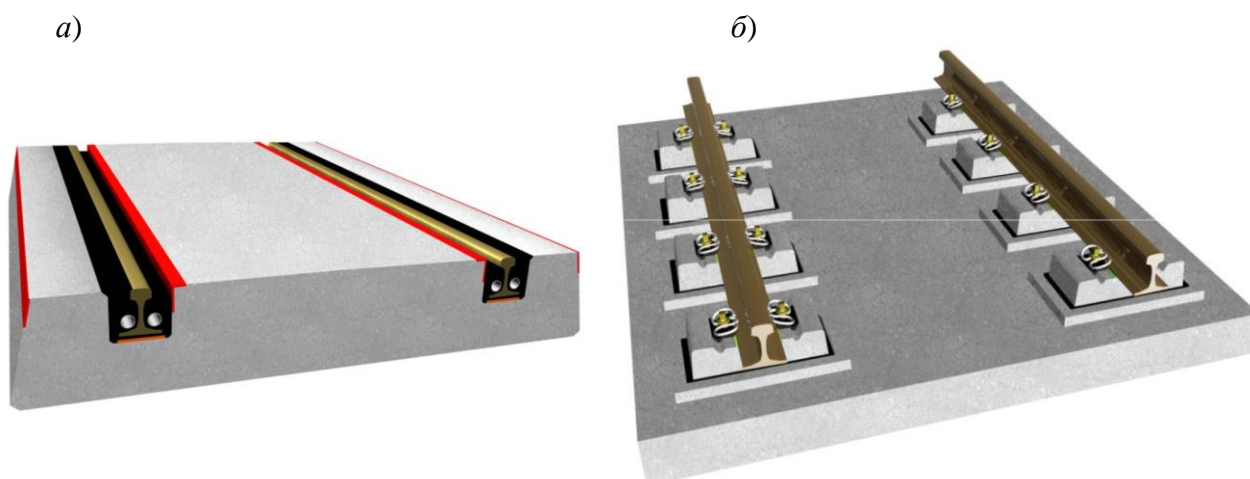


Рис. 3. Сучасні залізобетонні підрейкові основи: *a* – збірна (для залізничних переїздів) або монолітна (для трамвайних колій) з вібро- та електроізолюваною рейкою, укладеною у жолоб; *б* – збірно-монолітна на вібро- та електроізолюваних блочних опорах

Ці конструкції забезпечують високі міцність і стійкість конструкцій полотна, стабільність положення рейок у процесі експлуатації і незмінну ширину колії, виключають вертикальну та горизонтальну нерівність колії і поздовжнє переміщення рейкових ниток. Це у свою чергу сприяє підвищенню безпеки руху поїздів, особливо при високих швидкостях. Ці конструкції дозволяють також зменшити будівельну висоту і вагу конструкції колії в порівнянні з іншими безбаластними системами, і отже,

висоту несучої конструкції моста або габаритів тунелю.

Підрейкові основи з ізолювальною рейкою застосовується переважно на залізничних переїздах (рис. 4, *а*) або трамвайних коліях (рис. 4, *б*), оскільки дає можливість забезпечити інтегроване залізнично-автомобільне (трамвайно-автомобільне) полотно. Підрейкова основа з ізолювальною в жолобі рейкою додатково підвищує безпеку руху поїздів за рахунок збереження цілісності рейкової колії навіть при утворенні в рейці тріщини.



Рис. 4. Залізобетонні підрейкові основи з ізолювальною рейкою, укладеною в жолоб: *а* – збірна на залізничному переїзді (Польща); *б* – монолітна на трамвайних коліях (м. Варшава, Польща)

Застосування збірних конструкцій дозволяє скорочувати тривалість проведення робіт, зменшувати витрати, пов'язані з тимчасовим припиненням руху. Скорочення часу проведення робіт набуває особливого значення у разі улаштування або перевлаштування переїздів, яке створює незручності як для залізничного, так і для автомобільного руху. Улаштування такого переїзду вимагає мінімальної кількості часу для монтажу та припинення руху за рахунок застосування великогабаритних збірних плит, довжина яких підбирається залежно від довжини переїзду та їх простого і швидкого

монтажу. При монтажі залізничного переїзду за даною системою в деяких випадках можна обмежитися припиненням руху всього на одну ніч. Регулювання положення рейки у вертикальній і горизонтальній площині (з точністю до 1 мм) перед заливкою мастикою здійснюється за допомогою прокладок різної товщини і клинів. Аналогічним чином прискорюється і монтаж прогонових будов, виготовлених з підрейковою основою поза будівельним майданчиком.

Підрейкові основи з ізолювальними блочними опорами застосовуються переважно в залізничних тунелях і тунелях

метрополітенів. Так, Варшавський залізничний вузол у Польщі містить декілька тунелів. По мірі реконструкції діаметрального тунелю в ньому улаштовуються виключно підрейкові основи на ізольованих блочних опорах (рис. 5, *a*). При будівництві тунелю нової

лінії до Варшавського аеропорту також улаштовані підрейкові основи на ізольованих блочних опорах (рис. 5, *б*). Останніми роками всі нові ділянки Варшавського метрополітену будуються з підрейковими основами на ізольованих блочних опорах (рис. 6).

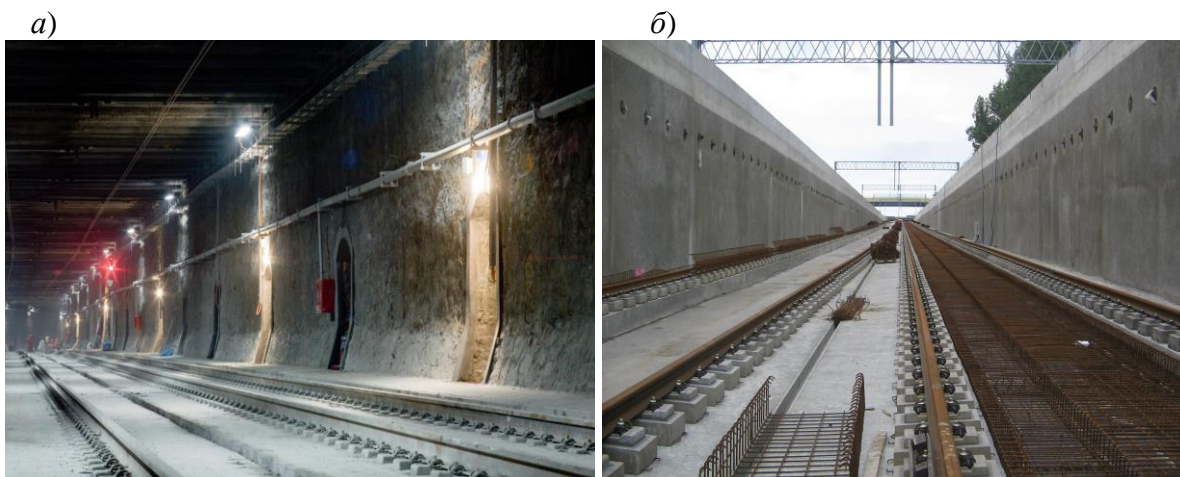


Рис. 5. Збірно-монолітні залізобетонні підрейкові основи з ізольованими блочними опорами в тунелях Варшавського залізничного вузла: *a* – діаметральний тунель, лінія № 448; *б* – виїмка на підході до тунелю нової лінії до Варшавського аеропорту

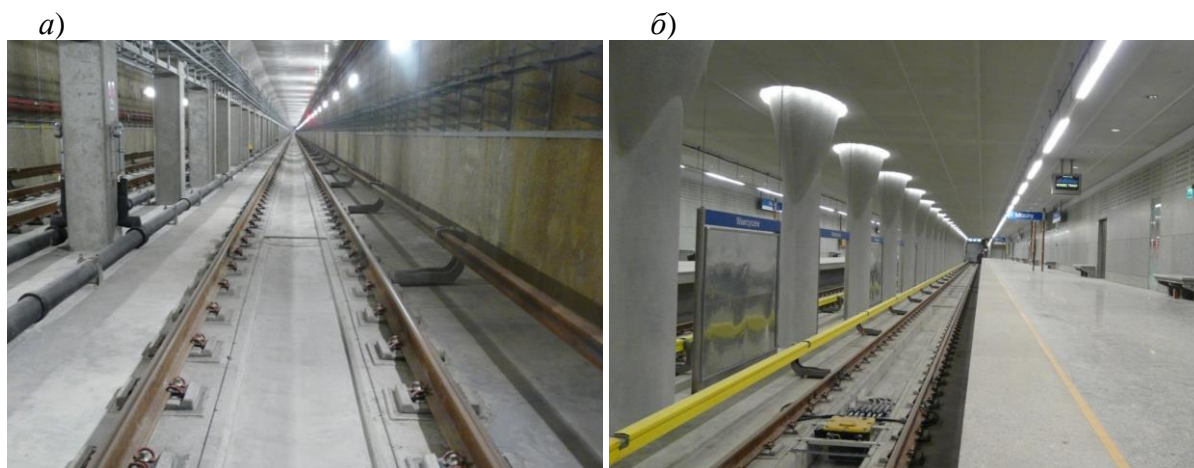


Рис. 6. Збірно-монолітні залізобетонні підрейкові основи з ізольованими блочними опорами в тунелях Варшавського метрополітену: *a* – перегінний тунель відрізка В 21 і В 22; *б* – станційний тунель станції А 21 і А 22

З 2010 р. підрейкові основи на ізольованих блочних опорах впроваджуються і в Україні. В Київському метрополітені на 1-й колії Куренівсько-

Красноармійської лінії 15.12.2010 була прийнята в експлуатацію експериментальна ділянка довжиною 200 м на ізольованих блочних опорах EBS виробництва фірми

Tines (Польща, рис. 7). За результатами експлуатації цієї ділянки було улаштовано

такі ж підрейкові основи на нових станціях – Виставковий центр та Іподром (рис. 8).



Рис. 7. Експериментальна ділянка на ізованих блочних опорах EBS виробництва фірми Tines (Польща) на 1-й колії Куренівсько-Красноармійської лінії Київського метрополітену

а)



б)



Рис. 8. Збірно-монолітні залізобетонні підрейкові основи з ізованими блочними опорами в станційних тунелях Київського метрополітену: а – ст. Виставковий центр; б – ст. Іподром

В збірно-монолітній підрейковій основі з ізованими блочними опорами рейки прикріплюються не до плити або шпал, а до окремих блочних опор, закріплених у готових зовнішніх залізобетонних або полімеркомпозиційних стаканах через еластичні прокладку і двокомпонентну мастику (рис. 9) [3, 4]. Зовнішні стакани при улаштуванні рейкового полотна замуруються в монолітну залізобетонну плиту (рис. 9).

Така конструкція у порівнянні з рейко-шпальною решіткою на баласті

забезпечує більш рівномірний розподіл навантаження від рухомого складу і гасіння коливальних, обумовлених його рухом. Залізобетонний блок з еластичними прокладкою і мастикою та пружним проміжним рейковим скріпленням забезпечують відповідність колії всім вимогам до міцності, жорсткості, пружності. Значна маса залізобетонних блоків забезпечує низький коефіцієнт динамічної жорсткості, що сприятливо впливає на розподілення вертикального і горизонтального тиску від коліс,

зменшуючи хвилеподібне зношування рейок. У цій системі існує можливість пристосування статичної і динамічної

жорсткостей до локальних експлуатаційних умов шляхом підбору характеристик прокладки і заливної мастики.

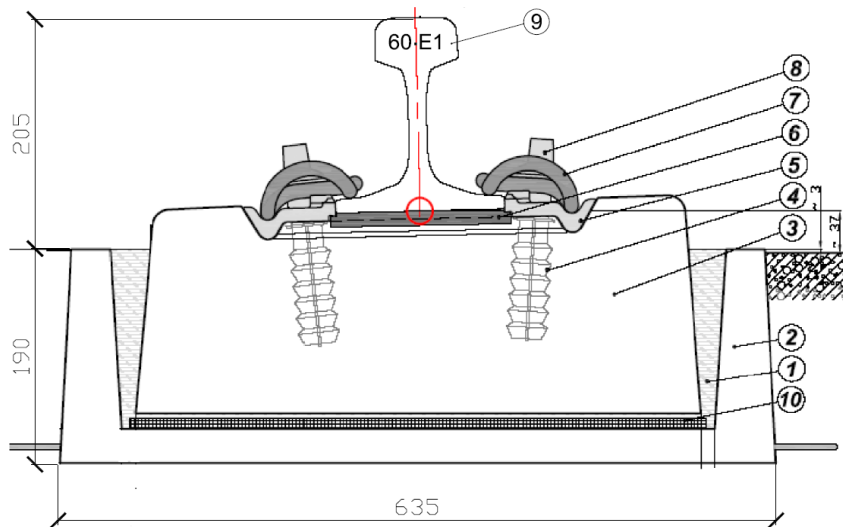


Рис. 9. Ізольована блочна опора з проміжним рейковим скріпленням Vossloh в складанні: 1 – заливна еластична мастика; 2 – зовнішній залізобетонний стакан; 3 – залізобетонний опорний блок; 4–8 – деталі скріплення Vossloh; 9 – рейка; 10 – еластична прокладка

Застосування збірно-монолітних конструкцій у порівнянні з монолітними дозволяє скорочувати тривалість проведення робіт за рахунок швидкого і нескладного монтажу блочних опор одразу у проектне положення за допомогою кондукторів та їх обетонування.

Основні переваги залізничного полотна на блочних опорах: стійкість з'єднання опори до дії вологи, морозу і корозії; ефективне гасіння коливань; можливість підбору ступеня гасіння коливань залежно від локальних умов; простий монтаж колії; проста конструкція і технологія виконання бетонного фундаменту; ефективна електрична ізоляція рейок; вільний доступ до рейок і скріплень; невелика будівельна висота конструкції з фундаментом; мінімальні витрати на експлуатацію.

Висновки та рекомендації

1. У наш час на залізницях і трамвайних лініях, в метрополітенах активно впроваджуються нові конструкції залізобетонних збірних, збірно-монолітних і монолітних підрейкових основ з вібро- та електроізолюваними блочними опорами або рейками.

2. Переваги цих конструкцій над традиційними рейко-шпальною решіткою на баласті і тощо:

- високі міцність і стійкість конструкцій полотна, стабільність положення рейок і колії в процесі експлуатації, виключення вертикальної та горизонтальної нерівності колії і поздовжнє переміщення рейкових ниток, більш рівномірний розподіл навантаження від рухомого складу і гасіння коливань від нього, зменшення зносу рейок, у т.ч. хвилеподібного, що сприяє підвищенню безпеки руху поїздів, особливо при високих швидкостях;

- можливість пристосування статичної і динамічної жорсткостей колії, здатності гасіння коливань до локальних експлуатаційних умов шляхом підбору характеристик прокладок і заливної мастики;

- стійкість до дії вологи, морозу, корозії, електрокорозії, ефективна електрична ізоляція рейок;

- зменшена будівельна висота і вага конструкції колії в порівнянні навіть з іншими безбаластними системами, і отже, висота несучої конструкції моста або габаритів тунелю;

- скорочення тривалості проведення робіт, наприклад, при улаштуванні залізничних переїздів із великогабаритних збірних плит або при улаштуванні колії на блочних опорах за рахунок їх швидкого і нескладного монтажу одразу у проектне положення за допомогою кондукторів та обетонування.

3. Виходячи із переваг визначені галузі застосування збірно-монолітного безбалластного залізничного полотна на блочних опорах:

- мости, тунелі;

- станційні колії, перегінні колії, стрілочні переводи і глухі перехрестя в межах населених пунктів;

- колії на прямих і кривих ділянках радіусом 160 м та більше;

- можливість монтажу контррейок, напрямних;

- різні системи кріплення;

- рейки будь-якого профілю;

- максимальний тиск на вісь 245 кН;

- максимальна швидкість залізничних транспортних засобів 250 км/год.

Список літератури

1. Даниленко, Е.І. Залізнична колія. Улаштування, проектування і розрахунки, взаємодія з рухомим складом [Текст]: підручник для ВНЗ у 2 т. / Е.І. Даниленко. – К.: Інпрес, 2010. – Т. 1. – 528 с.

2. Электрокоррозия железобетонных мостов и других искусственных сооружений [Текст] / А.Н. Плугин, А.А. Скорик, А.А. Плугин и др. // Залізничний транспорт України. – 2004. – № 1. – С. 11-13.

3. Вуйчак, И. Современные конструкции безбалластного полотна как решение эксплуатационных проблем рельсовых дорог [Текст] / И. Вуйчак // Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2009. – Вип. 109. – С. 93–113.

4. Tines s.r. Офіційний сайт / www.tines.com.ua.

Ключові слова: підрейкова основа, залізобетон, віброізоляція, шумоізоляція, електричний опір.

Анотації

Проведений аналіз конструктивних особливостей залізобетонних підрейкових основ залізниць з метою їх подальшого удосконалення, у т.ч. збільшення електричного опору та електрокорозійної стійкості, зниження шуму та вібрації. Найбільш перспективною для цього визнана суцільна залізобетонна підрейкова основа, яка виконується блочною (збірною), монолітною, збірно-монолітною. Показані переваги та недоліки цих конструкцій, визначені шляхи з подальшого покращення їх характеристик.

Проведен анализ конструктивных особенностей железобетонных подрельсовых оснований железных дорог с целью их дальнейшего усовершенствования, в т. ч. увеличения электрического сопротивления и электрокоррозионной стойкости, снижения шума и вибрации. Наиболее перспективной для этого признано сплошное железобетонное подрельсовое основание, выполняемое блочным (сборным), монолитным, сборно-монолитным. Показаны преимущества и недостатки этих конструкций, определены пути дальнейшего улучшения их характеристик.

The analysis of structural features under rail concrete foundations railways for further improvement, including increase in electrical resistance and electro corrosive stability, lower noise and vibration. The most promising for this under rail recognized solid concrete foundation block is executed, monolithic, precast-monolithic. The advantages and disadvantages of these designs, the ways to further improve their performance.

УДК 691

*Асп. В.В. Юрченко (ДонІЗТ),
доктори техн. наук
Л.А. Тимофеева, А.А. Плуґін*

V.V. Yurchenko, L.A. Timofeeva, A.A. Plugin

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ З РОЗРОБЛЕННЯ СКЛАДУ І ТЕХНОЛОГІЇ КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ ІЗ ТЕРМОПЛАСТИЧНИХ ПОЛІМЕРІВ І ВІДХОДІВ ДЕРЕВИНИ

METHODS OF EXPERIMENTAL RESEARCH ON THE DEVELOPMENT OF THE TECHNOLOGY AND COMPOSITE OF A THERMOPLASTIC POLYMER AND WOOD WASTE

Постановка проблеми. Останніми роками натуральна деревина у будівельних виробках і конструкціях все частіше замінюється композиційними матеріалами на її основі – ДСП, ОСП, ДВП, МДФ, в яких як зв'язуючі використовуються екологічно-небезпечні феноло-, мочевино- та меламіноформальдегідні терморективні полімери.

Підвищити екологічну безпеку композиційних матеріалів на основі деревини дозволить застосування як зв'язуючих термопластичних полімерів, тобто створення термопластичних деревно-полімерних композиційних матеріалів (далі ТДПК). Як компоненти ТДПК обрано: відходи деревини – тирсу, стружку, які утворюються при заготовці і переробці деревини; вторинний термопластичний полімер із відходів побутового господарства та виробництва – поліетилен

високого тиску, низької щільності. Особливо важливим є те, що всі компоненти ТДПК є вторинною сировиною, що відповідає світовим екологічним тенденціям утилізації відходів.

Термопластичні полімери є високоефективними в технологічному, споживчому, економічному плані матеріалами. Для формоутворення виробів із термопластичних полімерів і композиційних матеріалів на їх основі застосовують наведені далі способи [1].

Екструзія обмежується виготовленням погонажних виробів – плит, труб, різних за складністю профілів. Основний недолік екструзії – невелике відхилення від технології порушує складні процеси течії та формування кінцевого продукту, обмеження профільними виробами.

Лиття під тиском дозволяє отримувати об'ємні вироби більшої

кількості найменувань у порівнянні з екструзією. Недоліки цієї технології: нерівномірне заповнення ливарної форми, незастигання суміші у формі, абразивний знос плунжерних та інших вузлів машин, необхідність точного дотримання технології.

При ротаційному формуванні відбувається заповнення нагрітої форми порошком. При охолодженні форми частинки порошку спікаються на її поверхні. Цей спосіб є досить вимогливим

до виготовлення вихідної суміші, а саме до розподілення її складових після приготування.

Пряме пресування у прес-формах з використанням гідравлічного пресу полягає у переведенні твердого у вихідних умовах прес-матеріалу у в'язкотекучий стан і подальшому формуванні з розплаву виробу під дією тиску (рис. 1). При цьому відбувається хімічна реакція, а також утворення форми виробу, яка, як правило, стійка при температурі пресування.

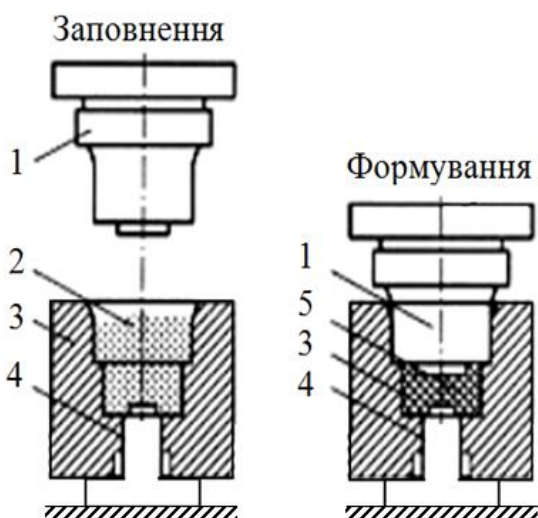


Рис. 1. Схема прямого пресування:

- 1 – пуансон; 2 – прес-матеріал;
- 3 – матриця; 4 – нижній пуансон;
- 5 – виріб

Порівнюючи наведені способи отримання виробів з термопластичних полімерів і композиційних матеріалів на їх основі, можна зазначити, що екструзія, ротаційне формування та лиття під тиском мають технологічні обмеження, обладнання для них є досить складним та дорогим, і відрізняються складністю налагодження, способи придатні переважно для масового виробництва [2]. На відміну від цього, пресове обладнання для прямого пресування достатньо просте, дешеве, доступне та нескладне в обслуговуванні. Виходячи з цього для виготовлення виробів із ТДПК і експериментальних досліджень з розробки їх складу і технології обрано спосіб прямого пресування.

Мета роботи – розроблення методики експериментальних досліджень з розробки складу і технології композиційного матеріалу на основі термопластичних полімерів і відходів деревини.

Матеріали і основне обладнання. Для експериментальних досліджень обрано матеріали:

1) вторинний поліетилен високого тиску низької щільності у вигляді порошку (рис. 2);

2) відходи деревини фракції 0,1 – 8 мм, які були розсіяні на фракції: 0,1–1; 1–2; 0,1–2 мм; понад 2,0 мм та не розсіяні. Фракціонування виконували для експериментального визначення фракції, найбільш придатної для складу прес-матеріалу.

Для зважування компонентів застосовували електронні ваги з точністю вимірювань 0,01 г. Зразки ТДПК виготовляли у прес-формі, що має розміри, які дозволяють завантажувати прес-матеріал в один прийом [3]. Для



Рис. 2. Порошковий поліетилен

попереднього підігріву прес-матеріалу використовували муфельну піч. Пресування нагрітого прес-матеріалу здійснювали за допомогою ручного гідравлічного преса, який створює зусилля до 12 т (рис. 3).

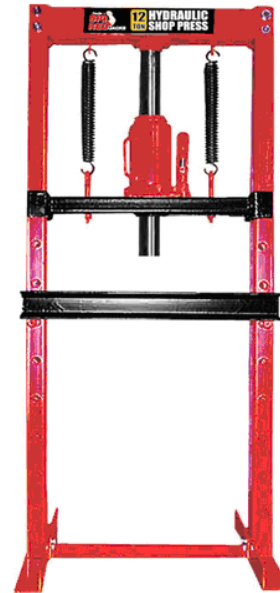


Рис. 3. Загальний вигляд гідравлічного преса

Технологічний процес пресування складається з основних операцій: підготовки, дозування й завантаження в прес-форму; попереднього підігріву; пресування; витримки й охолодження під тиском; видалення готового виробу.

Підготовка прес-матеріалу до експериментального дослідження полягає у визначенні його технологічних характеристик і їх доведення при необхідності до потрібних величин, дозування вихідних компонентів та їх змішування.

Дозування змішаного матеріалу в прес-форму може здійснюватися декількома способами: об'ємним, масовим і штучним. У першому випадку необхідна для запресовування кількість матеріалу відбирається за допомогою посудини або бункера відомого об'єму, у другому випадку матеріал зважується, у третьому

береться певне число таблеток відомої маси [1]. Для експериментальних досліджень обрано ваговий спосіб, який є точним, простим і зручним. Дозований прес-матеріал завантажують у форму, яку поміщують у муфельну піч для попереднього нагріву.

Попередній нагрів у виробничих умовах дозволяє скоротити тривалість перебування матеріалу в прес-формі й відповідно скорочує тривалість всього циклу пресування. При експериментальних дослідженнях попередній нагрів виконується у прес-формі. Матеріал у прес-формі необхідно прогріти в повному об'ємі й, по можливості, рівномірно, не перегріваючи його поверхневих шарів. Температура попереднього підігріву має бути такою, щоб не відбулись процеси термічної деструкції поліетилену (340°C),

його піролізу з утворенням воскоподібної речовини (475°C) [4], горіння тирси, яке полягає у розпаді геміцелюлози (200–260°C), целюлози (240–350°C), лігніну (280–500°C) [5]. Після визначеного часу температурного прогрівання прес-форму видаляють із муфельної печі та виконують пресування.

З моменту контакту плунжера, що опускається, з поверхнею перс-матеріалу у формі виникає тиск, який змушує в'язко-пластичний матеріал розтікатися, заповнюючи порожнину форми, і досягає найбільшого значення в момент остаточної зупинки пуансона після змикання форми.

Зусилля, що розвивається пресом, витрачається на тертя з деревинним наповнювачем і полімером при течії у формі, на подолання внутрішнього тиску газоподібних продуктів відкидання. Для характеристики режиму процесу використовують питомий тиск пресування, тобто зусилля, що припадає на одиницю

площі пресування. Під площею пресування розуміють площу проекції виробу на площину рознімання прес-форми [1].

Питомий тиск на матеріал P розраховується за формулою:

$$P = \frac{1000 \cdot N}{F \cdot n}, \text{ кгс/см}^2, \quad (1)$$

де N – ефективне зусилля преса, т; F – площа пресування, см²; n – число гнізд (у даному випадку $n=1$).

Після повного стискання здійснюють витримку, яка починається з моменту створення тиску пресування в зімкнутій формі та закінчується в момент підйому пуансона і розмикання форми для видалення отриманого виробу. Одночасно з витримкою здійснюють охолодження прес-форми під тиском. Після повного охолодження прес-форми готовий зразок (рис. 4) видаляють із неї.



Рис. 4. Зразок ТДПК та його поперечний розріз

Склади ТДПК призначають з метою експериментального визначення оптимального з них, варіюючи фракційний

склад деревного наповнювача D і його співвідношення з полімером P (див. таблицю).

Таблиця

Характеристики складів суміші для експериментальних досліджень

Склад суміші Д/П	Номер складу з відходами деревини фракції, мм				
	0,1 – 1,0	1,0 – 2,0	0,1 – 2,0	понад 2,0	не розсіяні
80/20	1	4	7	10	13
70/30	2	5	8	11	14
60/40	3	6	9	12	15

Досліджувані показники властивостей. На етапі попередніх досліджень якість одержуваних ТДПК контролюють за зовнішнім виглядом поверхні зразка та його розрізу (рис. 4) і показниками фізичних властивостей [6]:

- густиною ТДПК:

$$\gamma_d = \frac{m}{V}, \text{ г/см}^3, \quad (2)$$

де m – маса зразка ТДПК, г; V – об'єм зразка ТДПК, см³;

- пористістю насипної прес-маси:

$$n_{нас} = \frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_s}, \%, \quad (3)$$

де γ_s – насипна густина вологої тирси;

- пористість ТДПК:

$$n = n_{нас} - n_{вт.вол}, \%, \quad (4)$$

де $n_{вт.вол}$ – визначена втрата вологості готового виробу відносно насипної маси, в цьому дослідженні склала 1 % від насипної маси зразка, отже, $n_{вт.вол} = 0,01n_{нас}$;

- коефіцієнт пористості ТДПК:

$$e = \frac{\gamma_s' - n}{\gamma_s'}, \quad (5)$$

де γ_s' – насипна густина сухої тирси.

Висновки та рекомендації. Таким чином, розроблено методику експериментальних досліджень з розробки складу і технології композиційного матеріалу на основі термопластичних полімерів і відходів деревини, зокрема:

- обрано компоненти ТДПК – відходи деревини у вигляді тирси, стружки і вторинний термопластичний полімер із відходів побутового господарства та виробництва – поліетилен високого тиску низької щільності;

- обрано обладнання і технологію виготовлення зразків ТДПК – пряме пресування у прес-формі з попереднім підігрівом;

- обрано фактори, які передбачене варіювати в експериментальних дослідженнях: крупність фракції відходів деревини, співвідношення кількості відходів деревини і полімеру;

- обрано показники властивостей на виході експерименту – зовнішній вигляд, показники фізичних властивостей – густина ТДПК, пористість насипної прес-маси, пористість і коефіцієнт пористості ТДПК.

Експериментальні дослідження тривають.

Список літератури

1. Производство изделий из полимерных материалов [Текст] / В.В. Крыжановский, М.Л. Кербер, В.В. Бурлов, А.Д. Паниматченко. – С.Пб.: Профессия, 2008. – 460 с.
2. Іскович-Лотоцький, Р.Д. Сучасні технології та обладнання формоутворення деталей з деревинно-полімерних композитних матеріалів [Текст] / Р.Д. Іскович-Лотоцький, М.О. Мовчанок // Вібрації в техніці та технологіях. – 2008. – № 1 (50). – С. 37-40.
3. ГОСТ 12019-66 Изготовление образцов для испытания из термопластов. Общие требования [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1966.
4. Энциклопедия полимеров [Текст] / под ред. В.А. Кабанов [и др.]. – М.: Советская Энциклопедия, 1977. – Т.3. – 1152 с.
5. Изучение закономерности роста температуры горения древесных опилок [Текст] / Л.А. Кудрявцев, П.М. Мазуркин. // Современные проблемы науки и образования ГОУ ВПО

Марийский государственный технический университет, Йошкар-Ола, Россия., 2009. – № 6. – С. 75-79.

6. Основания и фундаменты транспортных сооружений [Текст] / под ред. Г.П. Соловьева. – М.: Транспорт, 1995. – 336 с.

Ключові слова: відхід деревини, вторинний полімер, експериментальні дослідження.

Анотації

Виконана і розроблена методика експериментальних досліджень складу композиційного матеріалу на основі відходів деревини і термопластичних полімерів. Встановлені вимоги до складу деревинно-полімерних композитів на основі відходів деревини і вторинних полімерів.

Выполнена и разработана методика экспериментальных исследований состава композиционного материала на основе отходов древесины и термопластичных полимеров. Установлены требования к составу древесно-полимерных композитов на основе древесных отходов и вторичных полимеров.

Made and the method of experimental studies of the composite material on the basis of waste wood and thermoplastic polymers. The requirements for the composition of wood-plastic composites based on wood waste and secondary polymers.

УДК 691.3

*Д-р техн. наук А.А. Плугин (УкрГАЗТ),
В.А. Арутюнов,
канд. техн. наук Т.А. Костюк (ХНУБА)*

A.A. Plugin, V.A. Arutyunov, T.A. Kostyuk

ГИДРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ СОСТАВЫ НА ОСНОВЕ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА, АРМИРОВАННЫЕ ПОЛИМЕРНЫМИ ВОЛОКНАМИ: ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛИЭФИРНОЙ МИКРОФИБРЫ

WATERPROOFING COMPOUNDS BASED ON PORTLAND CEMENT, REINFORCED WITH POLYMER FIBERS: EVALUATION OF THE POSSIBILITY OF POLYESTER MICROFIBER

Постановка проблемы. Согласно экспертным оценкам [1] от 15 до 75% строительных конструкций в процессе эксплуатации подвергаются воздействию агрессивных сред, а 5-10% из них ежегодно выходят из строя, поэтому вопросам

долговечности зданий и сооружений во всем мире уделяется большое внимание. При ремонтных работах широко применяются цементные составы, обладающие высокой адгезией к поверхности бетона. Из современных

наиболее универсальных материалов, применяемых для защиты от химических и физических агрессивных воздействий, можно выделить цементные составы пониженной проницаемости [2; 3], особое место среди которых занимают гидроизоляционные составы так называемого интегрально-капиллярного действия, формирующие уплотненную структуру за счет прорастания в капилляры, микротрещины и поры бетона новых нерастворимых или малорастворимых кристаллогидратов. Такие защитные составы обладают широким спектром действия и применения и могут обеспечить защиту бетона от биологической коррозии, быструю ликвидацию напорных и безнапорных течей, ремонт железобетонных конструкций с пассивацией арматуры [4].

Однако при всех известных достоинствах цементных составов у цементного камня имеются существенные недостатки – невысокая прочность при растяжении (приблизительно в 10 раз ниже прочности при сжатии), усадка, приводящая к образованию трещин. Это ограничивает применение цементных составов в ремонтных и реставрационных работах. Ремонтные составы обычно наносятся тонким слоем, и отношение площади нанесения к объему нанесенного состава является весьма большой величиной. Это является причиной быстрого испарения воды, приводит к возникновению и развитию усадочных напряжений и трещин. Увеличить прочность при растяжении, уменьшить усадку и трещинообразование эффективно позволяет дисперсное армирование полимерным или минеральным волокном, стальной фиброй различной длины или их сочетаниями [5]. Наполнение цементных составов микрофиброй существенно влияет также на их гидрофизические свойства.

Опыт применения полимерных волокон, например полипропиленовых, в качестве армирующих добавок в бетоны и

строительные растворы показал, что волокна не только значительно уменьшают микротрещинообразование, но и способствуют уплотнению микроструктуры, что является основным фактором повышения долговечности бетона и защиты стальной арматуры. Вместе с тем полипропиленовое волокно имеет свои недостатки: деформируется даже при небольших растягивающих нагрузках, стареет, т. е. теряет свои свойства с течением времени, горит при воздействии открытого огня.

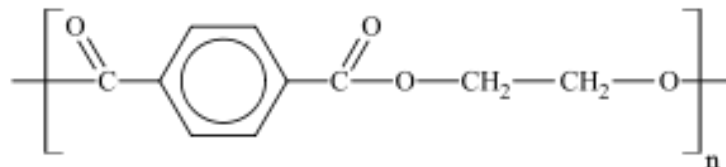
В мире накапливается и загрязняет окружающую среду большое количество промышленных отходов и пластиковой тары из полиэтилентерефталата ПЭТ, которые перерабатываются в полиэфирные волокна и могут применяться в бетонах и растворах вместо полипропиленовых волокон и асбеста. Полиэфирное волокно – синтетическое волокно, формируемое из расплава полиэтилентерефталата или его производных [6]. Достоинства – незначительная сминаемость, высокие свето- и атмосферостойкость, прочность, хорошая стойкость к истиранию и к органическим растворителям. Армирование бетона полиэфирными волокнами по результатам некоторых исследователей может повысить пластичность бетона, его термоустойчивость и прочность при сжатии, ударную прочность. Однако известно, что полиэфиры не стойки в щелочной среде, а о стойкости волокон в цементных составах единого мнения нет и этот вопрос требует дополнительного изучения [7; 8; 9].

Цель исследования – оценка возможности применения полиэфирной микрофибры для дисперсного армирования гидроизоляционных составов на основе портландцемента.

Основной материал исследований. В предыдущих исследованиях было установлено формирование кристаллического каркаса в перлитовых ячейках [10] или кристаллической обоймы вокруг стекловолкна в цементных гидроизоля-

ционных составах интегрально-капиллярного действия, содержащих комплекс солей для дополнительного синтеза кристаллогидратов с положительным знаком заряда поверхности [11; 12].

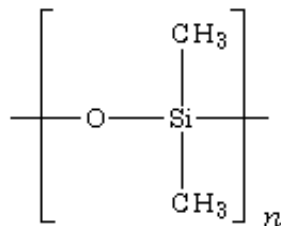
Предположим, что полиэфирное волокно также может выполнять роль подложки для роста продуктов гидратации



Анализ структурной формулы полиэтилентерефталата свидетельствует о его гидрофобности, следовательно, неспособности служить подложкой для продуктов гидратации цемента. Однако при изготовлении поверхность полиэфирного волокна обрабатывают силиконовым замас-

цемента и на его поверхности будет формироваться кристаллическая обойма, обеспечивающая прочное сцепление со всей структурой цементного камня и защищающая волокна от разрушения в щелочной среде. Полиэфирное волокно состоит преимущественно из полиэтилентерефталата [13]:

ливателем. Силиконы – это, как правило, органосилоксановые полимеры (полиорганосилоксаны) со структурной формулой $[R_2SiO]_n$, где R – органическая группа (метильная, этильная или фенильная), например простейший представитель силиконов – полидиметилсилоксан [13]:



Эти группы могут обладать дипольным моментом относительно силоксановой цепи (по аналогии с [14]), следовательно, обеспечивать силиконовой пленке гидрофильность и электроповерхностный потенциал, т.е. способность служить подложкой для продуктов гидратации цемента.

Выполнены электронно-микроскопические исследования цементного гидроизоляционного состава с химическими добавками и полиэфирным волокном. На рис. 1 представлены электронно-микроскопические снимки полиэфирных волокон с пленкой силиконового замасливателя.

На рис. 2 и 3 представлены электронно-микроскопические снимки полиэфирных волокон в цементном гидроизоляционном составе через 1 и 28 суток твердения, соответственно. Из рис. 2 и 3 видно, что уже в первые сутки твердения поверхность волокна покрыта продуктами гидратации (рис. 2), которые на 28 сутки образуют сплошную обойму, в составе которой просматриваются кристаллогидраты гексагонального портландита и кубического гидроалюмината кальция, а также гелеобразных гидросилократов кальция (рис. 3).

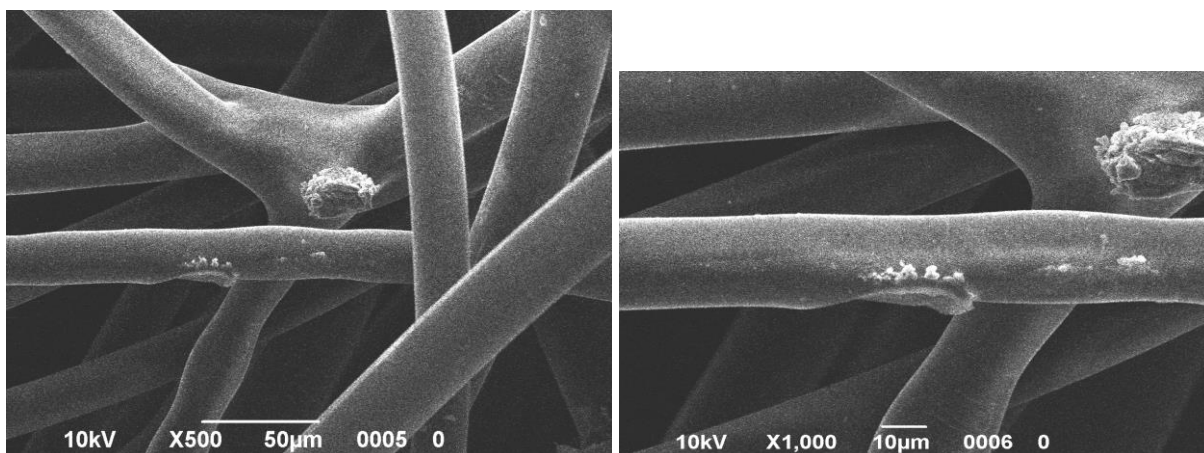


Рис. 1. Электронно-микроскопический снимок полиэфирного волокна с силиконовой пенкой. Сканирующий электронный микроскоп

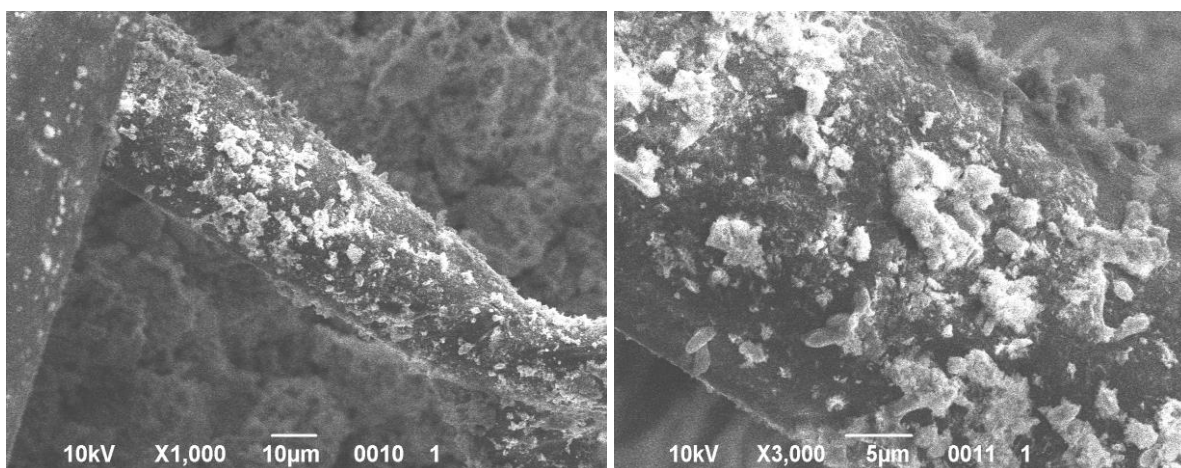


Рис. 2. ЭМС полиэфирного волокна в цементном гидроизоляционном составе через 1 сутки твердения. СЭМ

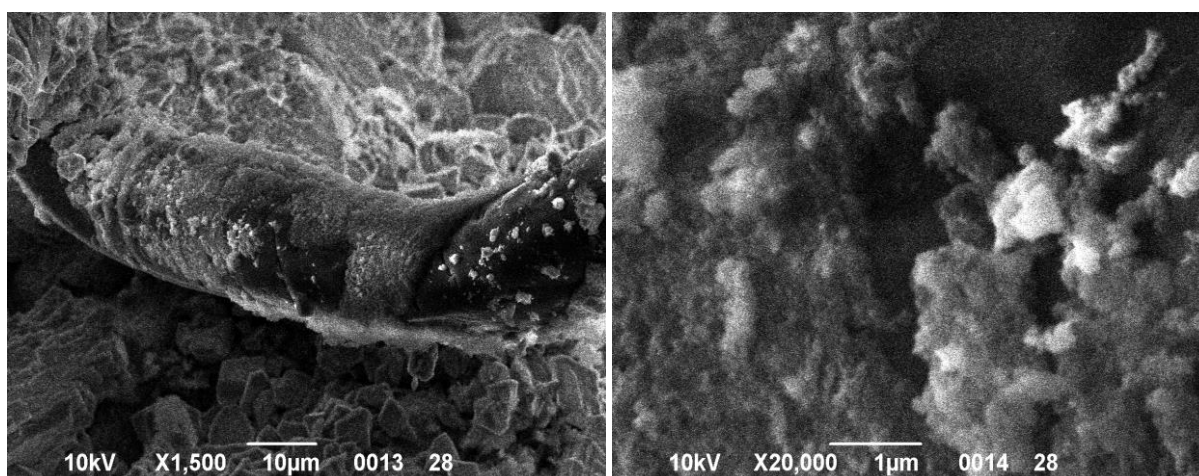


Рис. 3. ЭМС полиэфирного волокна в цементном гидроизоляционном составе через 28 суток твердения. СЭМ

Наполнение цементного камня волокнами до определенных пределов увеличивает его прочность на растяжение, однако их избыток приводит к увеличению пористости и ухудшению гидрофизических характеристик покрытий.

Выполнены исследования зависимости прочности при изгибе и водопоглощения цементного гидроизоляционного состава от степени его наполнения

волокнами (содержания по объему, табл. 1, рис. 4-6). Из рис. 4, а видно, что максимальные значения прочности при изгибе отмечаются при содержании волокна 4,0-4,2 % от массы цемента. При этом из рис. 4, б видно, что водопоглощение остается минимальным при содержании волокна до 4,5%, после чего начинает резко возрастать.

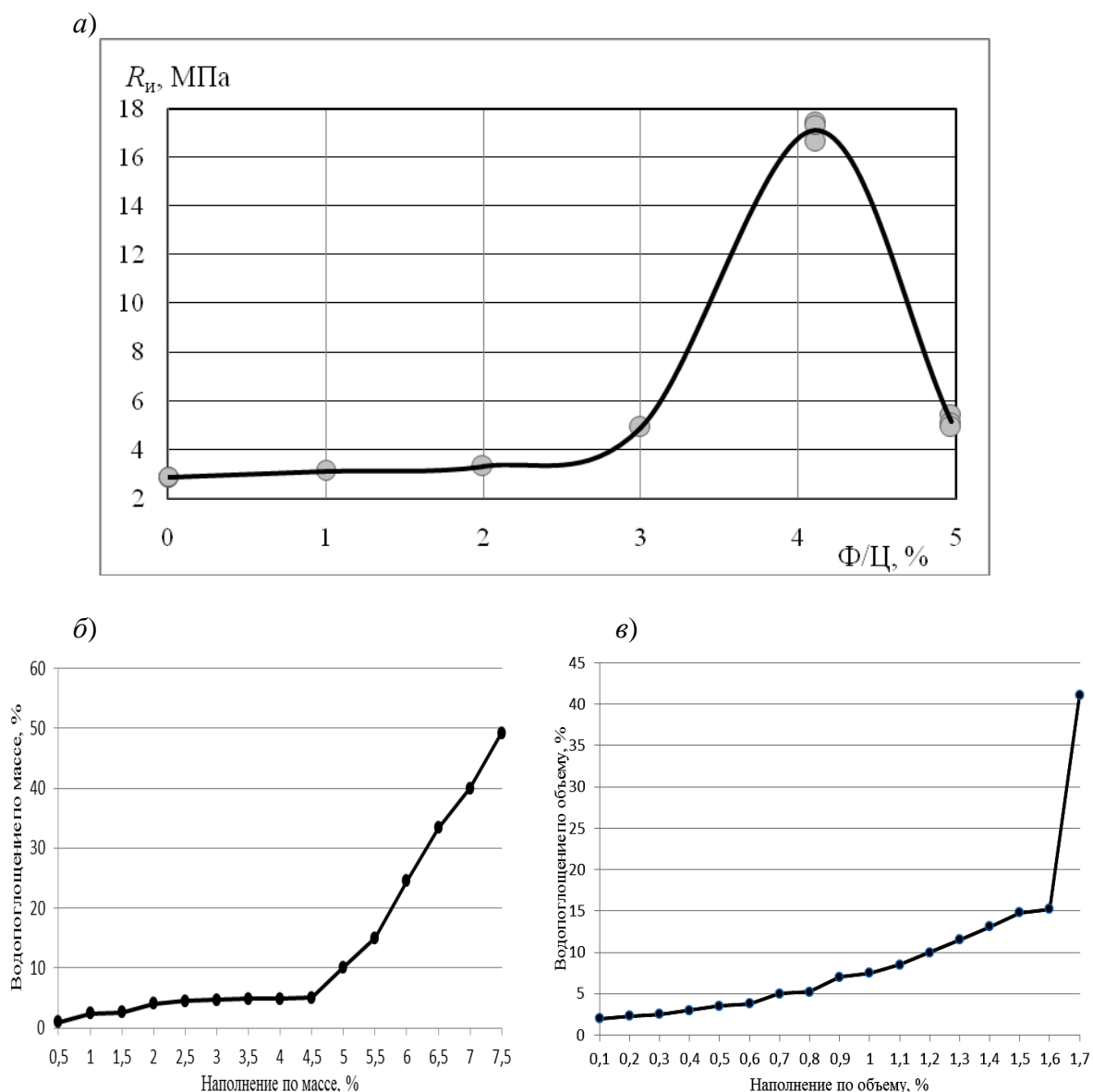


Рис. 4. Зависимость от содержания волокна (наполнения по массе или объему) прочности при изгибе (а), водопоглощения по массе (б) и объему (в) цементного гидроизоляционного состава

Выполнено исследование капиллярного поднятия воды по образцам-балочкам из цементно-песчаного раствора, покрытым цементным гидроизоляционным составом с разным содержанием полиэфирного волокна. Для этого образцы, покрытые составами с содержанием фибры 5,0 % по массе (образец 1, рис. 5) и 4,1 % по массе (образец 2, рис. 5) помещали горизонтально в емкость с водой таким образом, чтобы ее уровень достигал половины высоты балочек (рис. 5, б).

Из рис. 5, б видно, что по образцу 1, покрытому составом с 5,0 % фибры, вода поднимается на всю высоту и проступает на его верхней грани, т. е. этот состав впитывает воду под действием капиллярных сил. Поверхность образца 2, покрытого составом с 4,1 % фибры, остается сухой, что свидетельствует о его непроницаемости для капиллярного впитывания воды.

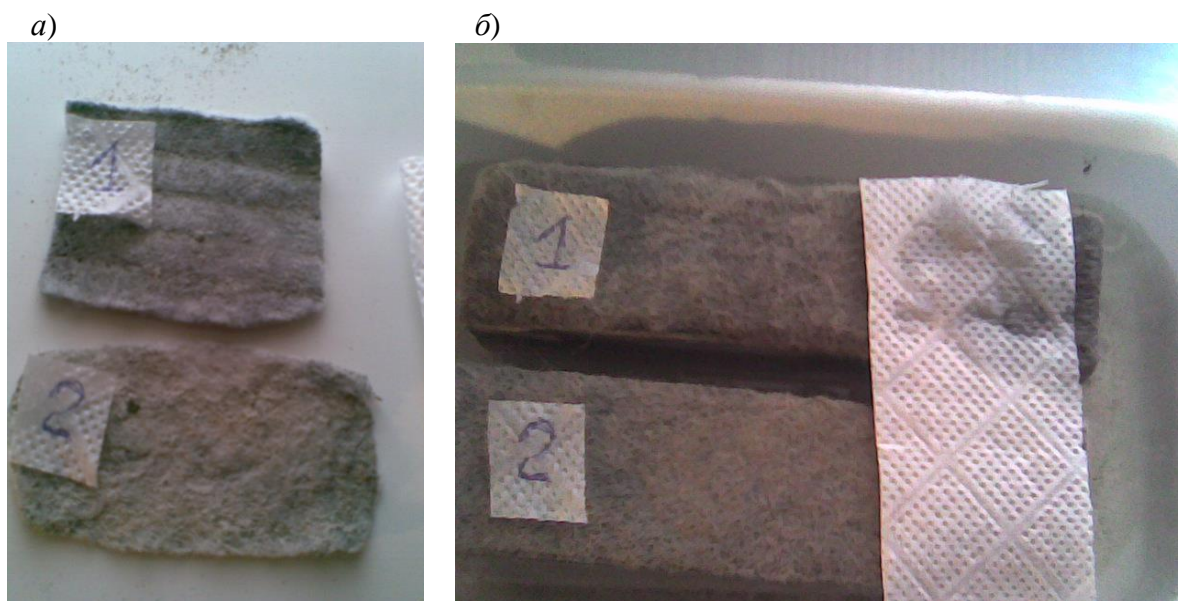


Рис. 5. Исследование капиллярного поднятия воды по цементным гидроизоляционным составам с содержанием фибры 5,0 % по массе (состав 1) и 4,1 % по массе (состав 2): а – гидроизоляционные покрытия в сухом состоянии; б – образцы-балочки из цементного гидроизоляционного состава в емкости с водой

Выводы и рекомендации

1. В результате проведенных исследований установлено, что полиэфирная микрофибра представляет собой волокна из полиэтилентерефталата, покрытые силиконовым замасливателем, обеспечивающим способность волокна служить подложкой для продуктов гидратации цемента, и в целом пригодна для дисперсного армирования цементных гидроизоляционных составов.

2. Установлено, что при твердении цементного гидроизоляционного состава с полиэфирной микрофиброй на поверхности

ее волокон образуется обойма из продуктов гидратации цемента – кристаллогидратов гексагонального портландита и кубического гидроалюмината кальция, а также гелеобразных гидросиликатов кальция.

3. Установлено, что добавка в цементный гидроизоляционный состав полиэфирной фибры в количестве 4,0-4,2 % от массы цемента обеспечивает максимальное повышение прочности при изгибе, однако увеличение ее содержания свыше 4,5 % приводит к резкому повышению водопоглощения и способности к капиллярному впитыванию воды.

Список литературы

1. Степанова, В.Ф. Защита строительных конструкций – основа обеспечения долговечности зданий и сооружений [Текст] / В.Ф. Степанова // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2005. – № 3. – С. 16-19.
2. Москвин, В.М. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты [Текст] / В.М. Москвин, Ф.М. Иванов, С.Н. Алексеев, Г.А. Гузеев. – М.: Стройиздат, 1980. – 533 с.
3. Розенталь, Н.К. Коррозионная стойкость цементных бетонов низкой и особо низкой проницаемости [Текст] / Н.К. Розенталь. – М.: ФГУП ЦПП, 2006. – 520 с.
4. Кондращенко, Е.В. Оценка коррозионной стойкости арматуры под защитным слоем ВИАТРОНа [Текст] / Е.В. Кондращенко, В.И. Бабушкин, О.Ю. Прошин, Т.А. Костюк // Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков, 2004. – № 41. – С. 20-22.
5. Моргун, Л.В. О некоторых свойствах фибропенобетона неавтоклавного твердения и изделий из него [Текст] / Л.В. Моргун // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2005. – № 2. – С. 24-25.
6. Айзенштейн, Э.М. Технология производства химических волокон [Текст] / Э.М. Айзенштейн. – М., 1980. – С. 326-414.
7. Pelisser F., Montedo O., Gleize Ph., Roman H. Mechanical properties of recycled PET fibers in concrete [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1590/S1516-14392012005000088>.
8. Fraternali F, Ciancia V, Chechile R, G Rizzano, Feo L, Incarnato L. Экспериментальное исследование термомеханических свойств вторичного ПЭТ фибробетона композитных конструкций.- 2011.- 93:2368-2374. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.03.025> .
9. Patel J.K., Desai N.B., Rana J.C. Properties and Application of Steel, Polypropylene and Polyester Fibre // Fiber Reinforced Cements and Concretes Recent Developments. – London: Elsevier Applied Science, 1989. – pp. 306-315.
10. Бондаренко, Д.А. Теплоизоляционный материал с пониженной паропрооницаемостью [Текст] / Д.А. Бондаренко, Ю.А. Спирин, Н.Г. Привалова // Наук. вісн. будівництва. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2009. – Вип. 52. – С. 282-295.
11. Плугин, А.А. Обоснование выбора солей-электролитов для содержащих кальцит и стекловолокно комплексных добавок в гидроизоляционные сухие смеси [Текст] / А.А. Плугин, Н.Н. Партала, Т.А. Костюк, М.Г. Салия, Д.А. Бондаренко // Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка. – 2012. – № 44. – С. 105-108.
12. Плугин, А.А. Изотропное микроармирование цементного камня продуктами гидратации для повышения физико-механических характеристик гидроизоляционных покрытий [Текст] / А.А. Плугин, М.Г. Салия, Т.А. Костюк // Вісник НТУ «ХПИ»: зб. наук. пр. Тематичний випуск «Хімія, хімічна технологія та екологія». – Харків: НТУ «ХПИ». – 2011. – № 50. – С. 97-103.
13. Википедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org>
14. Майофис, И.М. Химия диэлектриков [Текст] / И.М. Майофис. – М.: Высш. школа, 1970. – 332 с.

Ключевые слова: портландцемент, гидроизоляционный состав, полиэфирное волокно, микроструктура, прочность при изгибе, водопоглощение.

Аннотации

Досліджено властивості цементного гідроізоляційного складу, що містить поліефірні волокна. Встановлено, що на поверхні волокна утворюється кристалічна обойма переважно з гексагонального портландіту і кубічного гідроалюмінату кальцію, що забезпечує міцне зчеплення з усією структурою цементного каменю і захищає волокна від руйнування в лужному середовищі.

Исследованы свойства цементного гидроизоляционного состава, наполненного полиэфирным волокном. Установлено, что на поверхности волокна образуется кристаллическая обойма преимущественно из гексагонального портландита и кубического гидроалюмината кальция, которые обеспечивают прочное сцепление со всей структурой цементного камня и защищает волокна от разрушения в щелочной среде.

The properties of the cement waterproofing composition, filled with polyester fiber. Found that on the surface of a crystalline fiber ferrule mainly of hexagonal and cubic portlandite hidroaluminumate calcium, which provide strong adhesion with the entire structure of cement stone and protects the fiber from damage in an alkaline environment.

УДК 622.355:691

*Канд. техн. наук А.Н. Рязанов (ЛНАУ),
доктора техн. наук В.И. Винниченко (ХНУСА),
А.А. Плугин (УкрГАЗТ)*

A.N. Ryazanov, V.I. Vinnichenko, A.A. Plugin

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОГО
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДОЛОМИТА И УГОЛЬНЫХ ОТХОДОВ
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**THEORETICAL BASIS OF INTEGRATED DOLOMITE AND COAL
WASTE FOR BUILDING MATERIALS**

Актуальность темы и постановка проблемы. Отечественная промышленность по удельным расходам топлива на единицу готовой продукции весьма далека от мировых показателей. В государственной программе «Энергетична стратегія України на період до 2030 р.» [1] признано, что в Украине удельный расход энергии на единицу валового национального продукта в 2,6 раза выше среднемирового. Промышленность

строительных материалов относится к ресурсоэнергоёмким отраслям, поэтому снижение расхода материальных и энергетических ресурсов на производство строительных материалов, особенно дорогостоящего топлива, является очень актуальной проблемой.

При производстве обжиговых строительных материалов использование в составе сырья промышленных отходов, содержащих топливную составляющую,

позволяет: снизить расход топлива; экономить природные материальные ресурсы; уменьшать закупки природного газа за рубежом; снизить экологическую нагрузку на районы размещения отходов. В Украине накоплены сотни миллионов тонн отходов обогащения углей [2]. Поскольку применяемое оборудование и технологии обогащения являются устаревшими, эти отходы содержат в своем составе, по разным данным, от 5 до 30 % угля. Терриконы и отвалы, в которых складированы углеотходы, занимают значительные площади земель и представляют собой источник экологической опасности для окружающей среды [3]. В Украине имеются также значительные запасы доломита, из которого на Докучаевском комбинате производят огнеупорные материалы для металлургической промышленности. В технологическом процессе предусмотрено использование доломита только фракции ≥ 5 мм, фракция меньшего размера транспортируется в отвалы. За годы работы комбината в отвалах накопились миллионы тонн отходов [4], в связи с чем г. Докучаево признан районом экологической катастрофы.

Комплексное использование угольных и доломитовых отходов при производстве строительных материалов обеспечит: снижение себестоимости производства стройматериалов; сокращение расходов на разведку новых месторождений минерального сырья; сохранение истощающихся минеральных ресурсов в недрах, поскольку запасов, накопившихся в отвалах, достаточно для удовлетворения потребности на многие десятилетия; улучшение условий труда, т.к. техногенные месторождения расположены на дневной поверхности в отличие от всё более глубокозалегающих обычных месторождений полезных ископаемых, освобождение занимаемых отвалами земель и ликвидацию источников загрязнения окружающей среды, улучшая тем самым экологическую обстановку вокруг действующих предприятий.

Однако процессы, происходящие при взаимодействии угольных и доломитовых отходов, остаются недостаточно изученными, что ограничивает возможности эффективного управления свойствами производимых из них огнеупоров.

Целью работы является установление закономерностей взаимодействия между углесодержащими отходами и доломитом при обжиге.

Метод исследования – термодинамический анализ реакций между веществами углесодержащих отходов и доломита при температуре обжига.

Основной материал исследования. Доломит представляет собой соединение карбонатов кальция $CaCO_3$ и магния $MgCO_3$. Относительно процессов, протекающих при тепловой обработке, существуют различные точки зрения. Наиболее вероятной [5; 6; 7] является диссоциация, на первой стадии которой образуются MgO и $CaCO_3$:



а на второй стадии



В зависимости от температуры обжига из доломита получают материалы различного состава и назначения:

- каустический доломит, состоящий из MgO и $CaCO_3$,
- цемент, состоящий из MgO , $CaCO_3$ и CaO [5],
- доломитовую известь – MgO и CaO , получаемую при мягком обжиге,
- металлургический доломит – MgO и CaO , обжигаемый до спекания.

Теоретические затраты тепловой энергии на реакции образования продуктов из доломита при обжиге (кроме металлургического) представляют собой затраты тепла на диссоциацию $MgCO_3$, $CaCO_3$, а также дегидратацию примесей

$$q_{kl} = G_{CaCO_3}^C \cdot (\Delta H_t)_1 + G_{MgCO_3}^C \cdot (\Delta H_t)_2 + G_{AS_2H_2}^C \cdot (\Delta H_t)_3,$$

где $G_{CaCO_3}^C$, $G_{MgCO_3}^C$, $G_{AS_2H_2}^C$ – соответственно, содержание карбоната кальция, карбоната магния и алюмосиликатов, диссоциировавших в доломите, на 1 кг клинкера; $(\Delta H_t)_1$, $(\Delta H_t)_2$, $(\Delta H_t)_3$ – энтальпия реакций декарбонизации карбоната кальция и карбоната магния, дегидратации алюмосиликатной примеси.

Вычисленная по этой формуле величина теоретических затрат тепловой энергии для обжига доломита в каустический доломит, состав которого представлен в таблице, составляет 225 ккал/кг клинкера. Для сравнения –

теоретический расход тепла на обжиг портландцементного клинкера Краматорского цементного завода составляет 425 ккал/кг клинкера. Фактический расход топлива на обжиг зависит от влажности сырьевого материала и коэффициента полезного действия теплового агрегата. Иными словами, при равенстве исходной влажности сырьевой смеси и коэффициента полезного действия печи, расход топлива на обжиг доломитового клинкера ниже по сравнению с портландцементным на 47 %, т.е. почти в два раза.

Таблица

Химический состав исходного доломита

Вид материала	<i>ППП</i>	<i>SiO₂</i>	<i>Fe₂O₃</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>CaO</i>	<i>MgO</i>	Σ
Доломит	45,92	2,15	0,60	0,52	29,83	20,53	99,55

Результаты пересчета на 1 кг готового продукта – извести показывают, что теоретический расход тепловой энергии на обжиг составляет: для кальциевой извести – 793 ккал/кг, для доломитовой извести – 692 ккал/кг. При условии равенства КПД и исходной влажности расход топлива на обжиг доломитовой извести меньше, чем расход топлива на обжиг кальциевой извести, ориентировочно на 12 %.

Анализ энергозатрат на обжиг доломитовых вяжущих указывает на целесообразность исследования совместного использования отсева доломита и отходов обогащения углей, при котором углеотходы будут служить альтернативным топливом для обжига отсева доломита. Это предполагает анализ процессов, происходящих в подготовительных зонах вращающейся печи при обжиге доломитового сырья с использованием углеотходов, определение

термодинамических параметров реакций разложения карбонатов кальция и магния в доломите с участием угольной составляющей и продуктов газификации угля, теоретической и действительной температуры горения отходов обогащения углей. Сравнение полученных величин температуры горения отходов и температуры декарбонизации при получении доломитовых вяжущих может показать один из следующих вариантов:

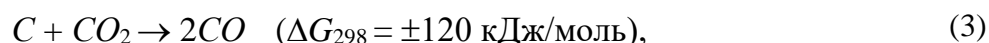
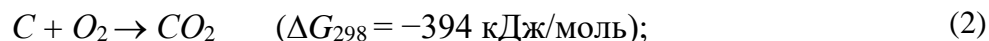
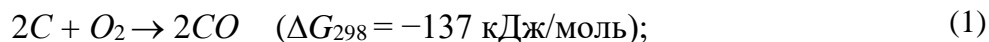
- температура горения отходов ниже температуры декарбонизации;
- температура горения отходов равна температуре декарбонизации;
- температура горения отходов выше температуры декарбонизации.

Если температура горения отходов обогащения углей ниже или равна температуре декарбонизации нужных в данном процессе карбонатов, то вычисляется, на сколько возможно снизить

расход основного технологического топлива. При превышении температуры горения возможен случай полной замены топлива отходами обогащения углей.

Поступающая во вращающуюся печь смесь доломита и отходов углеобогащения

постепенно продвигается в зону более высоких температур. При превышении температурой материала 350°C начинаются процессы взаимодействия углерода с кислородом в слое [8]. При этом возможны реакции [9-16]:



где ΔG_{298} – энергия Гиббса реакции при 298°K, кДж/моль углерода.

При относительно невысоких температурах термодинамически возможны две первые реакции, причем более вероятна вторая из них как обладающая наиболее отрицательным значением энергии Гиббса. Реакция (3) маловероятна (энергия Гиббса положительна), поэтому в начале взаимодействия выделяется лишь диоксид углерода, а оксид углерода практически не образуется. Однако в ходе реакции (3) происходит двукратное увеличение количества молекул газа, поэтому энтропия системы сильно возрастает. С повышением температуры это приводит к уменьшению положительного значения энергии Гиббса, а затем оно становится отрицательным, что делает реакцию (3) возможной. В связи с этим при температурах (400–750)°C (с момента начала реакции (3) до начала воспламенения оксида углерода) практически весь образующийся диоксид, взаимодействуя с углеродом сырья, превращается в оксид, т.е. протекают реакции (2) и (3), суммарный результат которых и выражается уравнением (1). Кроме того, в этом же температурном интервале происходят и интенсивные превращения углеродистого материала без доступа кислорода, в результате которых также выделяются горючие компоненты: углеводороды, водород и оксид углерода, которые, попадая в газовый поток с более

высокой температурой, способны к взаимодействию с кислородом [9].

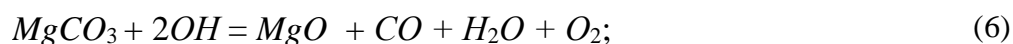
При этом одновременно протекают процессы остаточной сушки и дегидратации глинистых материалов примесей, диссоциации карбоната магния и термохимических превращений органической массы отходов углеобогащения. При одновременном протекании процессов, вероятно, происходит интенсификация процессов декарбонизации. Органическая масса отходов углеобогащения, подвергаясь термическому удару, быстро нагревается, а выделяющиеся парогазовые продукты попадают в высокотемпературную окислительную среду, где полностью сгорают. Это является фактором, способствующим повышению эффективности процесса в целом.

Кроме повышения скорости реакций с ростом температуры появляется возможность осуществления химических превращений по новым направлениям. Органическая масса отходов обогащения, находясь в слое материала, подвергается разложению с появлением продуктов газификации CO , OH , O_2 . Реагентом, способным к взаимодействию с углеродом, становится не только кислород, но и продукты газификации, выделяющиеся из массы материала. Концентрация реагентов

увеличивается, что по закону действующих масс увеличивает скорость взаимодействия. Образующиеся горючие продукты при температурах газового потока в подготовительных зонах печи полностью окисляются кислородом, поэтому общее количество выделяющегося тепла, в соответствии с законом Гесса, остается неизменным, но скорость протекания реакций увеличивается, что интенсифи-

цирует процесс в целом. Кроме того, реакции в органической части отходов протекают в слое материала, что способствует в свою очередь интенсификации процесса.

Для определения влияния на процесс диссоциации карбоната магния наличия углерода и продуктов его газификации при обжиге выполнен термодинамический анализ по [17] реакций:



Полученные результаты представлены на рисунке. Термодинамический анализ влияния органической составляющей отходов на реакции диссоциации карбоната магния показал, что реакция (4) термодинамически возможна

при температурах выше 600 К, а при участии органической составляющей отходов образование MgO термодинамически возможно в реакциях (5; 6; 7) уже при 400 К.

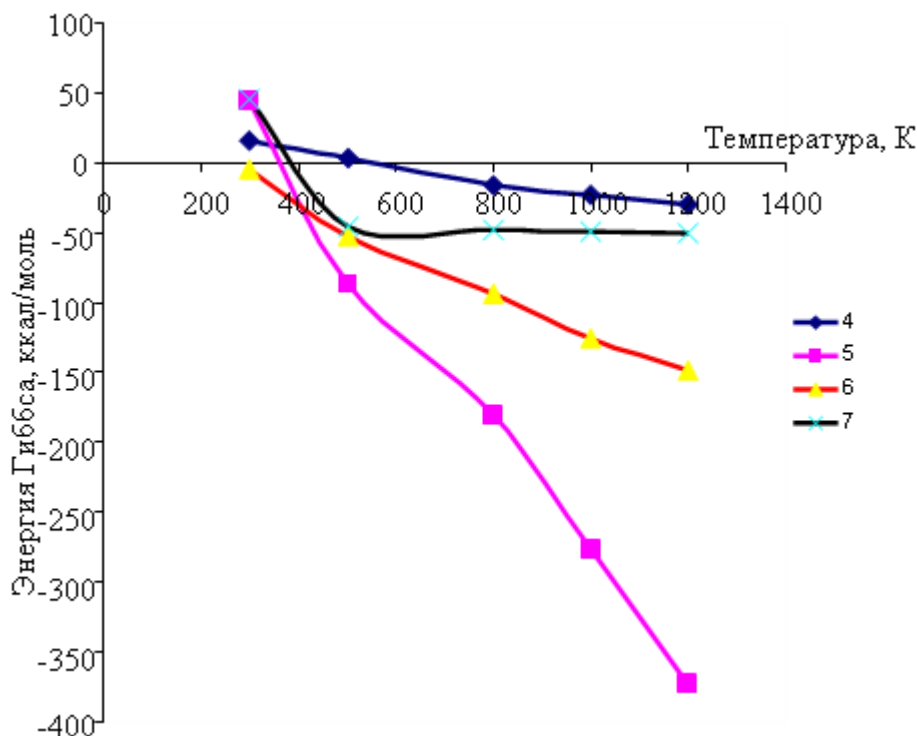


Рис. Зависимость от температуры энергии Гиббса реакций 4; 5; 6; 7

Анализ рисунка показывает, что разложение карбоната магния в присутствии углерода и продуктов его газификации становится термодинамически возможным при более низких температурах (на ок. 200°C), чем без их присутствия.

Теплосодержание газов на выходе из зоны обжига складывается из выделения тепла при сгорании органической части

$$I = B_w (Q_w - Q_f) + B_w c_w t_w + V_a c_a t_a + c_c \Delta t_c - Q_s - c_d \Delta t_d, \quad (8)$$

где B_w – расход отходов на 1 кг клинкера; Q_w – теплота сгорания отходов, кДж/кг отходов; Q_f – теплота сгорания летучих составляющих органической части отходов, кДж/кг отходов; c_w – теплоемкость отходов, кДж/кг×°C; t_w – температура отходов, °C; V_a – объем воздуха, необходимый для сгорания отходов, м³/кг клинкера; c_a – теплоемкость воздуха; t_a – температура воздуха; c_c – теплоемкость клинкера; Δt_c – разность температур

отходов, теплосодержания отходов, теплосодержания воздуха, предназначенного для сгорания органической части отходов, прихода тепла от охлаждения выходящего из печи готового материала за вычетом теплосодержания уходящих из зоны газов, потерь тепла в окружающую среду и расхода тепла на нагрев материала в зоне:

клинкера, °C; I – теплосодержание продуктов сгорания топливной составляющей отходов, кДж/кг клинкера; Q_s – потери тепла в окружающую среду, кДж/кг клинкера; c_d – теплоемкость клинкера; Δt_d – разность температур материала на входе в зону обжига и выходе из нее, °C.

С другой стороны теплосодержание смеси газов равно сумме теплосодержаний составляющих смесь компонентов [18]:

$$I = (V_{CO_2} c_{CO_2} + V_{H_2O} c_{H_2O} + V_{O_2} c_{O_2} + V_{N_2} c_{N_2}) \times t, \quad (9)$$

где t – температура продуктов сгорания отходов углеобогащения, °C; V_{CO_2} , V_{H_2O} , V_{O_2} , V_{N_2} – удельный выход продуктов сгорания, м³/кг клинкера; c_{CO_2} , c_{H_2O} , c_{O_2} , c_{N_2} – массовая теплоемкость продуктов сгорания, кДж/кг×°C.

Расчетная температура продуктов сгорания отходов углеобогащения, соответствующая теплосодержанию по реакции (8), определяется методом подбора из формулы (9)

$$t = I / (V_{CO_2} c_{CO_2} + V_{H_2O} c_{H_2O} + V_{O_2} c_{O_2} + V_{N_2} c_{N_2}). \quad (10)$$

Таким образом, теоретически определена температура горения отходов, которая составила (800–1000)°C, что достаточно для термической обработки доломита на получение клинкера каустического доломита и извести.

Выполнен расчет энергетических затрат на осуществление обжига во вращающейся печи клинкера каустического доломита с использованием в качестве

альтернативного топлива отходов углеобогащения углей с теплотой сгорания 11513,7 кДж/кг клинкера (2750 ккал/кг). Определен расход отходов углеобогащения, который составил 150 кг отходов на 1 тонну клинкера, расход условного топлива – 68,5 кг/т клинкера, расход тепла – 2010 кДж/кг клинкера (480 ккал/кг клинкера).

Выводы и рекомендации

1. Проанализированы процессы, происходящие при термической обработке доломита во вращающейся печи в массе материала, содержащего топливную составляющую.

2. Показано, что расход энергии на тепловую обработку доломита при получении вяжущих снижается:

- при обжиге на клинкер каустического доломита по сравнению с портландцементным клинкером – более чем на 45%;

- при обжиге на доломитовую известь по сравнению с кальциевой известью – более чем на 10%.

3. Выполнен термодинамический анализ возможности интенсификации процесса диссоциации карбоната магния при содержании в доломите угольной составляющей. Анализ показал, что углерод и продукты его газификации повышают термодинамическую вероятность снижения температуры начала реакции декарбонизации карбоната магния более чем на 200°C.

4. Установлено, что при комплексном использовании отходов углеобогащения и доломитового сырья для получения доломитовых вяжущих температура горения отходов составляет (800–1000)°С, что достаточно для термической обработки доломита на получение клинкера каустического доломита и извести. Это свидетельствует о том, что отходы углеобогащения могут быть использованы

для замены в печи основного технологического топлива.

5. Выполнен расчет энергетических затрат на осуществление процесса обжига во вращающейся печи клинкера каустического доломита с использованием в качестве альтернативного топлива отходов обогащения углей с теплотой сгорания 11513,7 кДж/кг клинкера (2750 ккал/кг). Определен расход отходов углеобогащения, он составляет 150 кг отходов на тонну клинкера, расход условного топлива – 68,5 кг/тонну клинкера, расход тепла – 2010 кДж/кг клинкера (480 ккал/кг клинкера).

6. Перспективность дальнейших исследований в этом направлении определяется следующими факторами:

- наличием значительных количеств отходов обогащения углей, накопившихся в терриконах и отвалах, имеющих в своем составе остатки угля;

- меньшими затратами тепловой энергии на обжиг доломитового клинкера по сравнению с портландцементным;

- пониженной температурой обжига доломитового клинкера по сравнению с портландцементным;

- наличием накопленного в отвалах доломитового отсева (отходов), а также отсева, который образуется в настоящее время при фракционировании доломита, используемого металлургической промышленностью для получения огнеупорных материалов.

Список литературы

1. Енергетична стратегія України на період до 2030 р. [Електронний ресурс] // www.mre.kmu.gov.ua/fuel/control/uk/doccatalog (Обращение 04.04.2013).

2. Дунаевская, Н.И. К вопросу о комплексном использовании шламов, сухих отходов углеобогащения, высокозольного и бурого угля в энергетике: Доклад на совещании у Президента НАН Украины 22.02.12 / Институт угольных энерготехнологий НАН Украины [Электронный ресурс] // <http://esco-ecosys.narod.ru/2012-5> (Обращение 04.04.2013).

3. Неоминерализация горящих угольных отвалов Донбасса [Текст] / Б.С. Панов, Ю.А. Проскурня, В.С. Мельников, Е.Е. Гречановская // Минералогический журнал. – 2000. – № 4. – Т.22. – С.37-46.

4. Єрмакова, Е.В. Оцінка стану навколишнього природного середовища в районі розміщення Докучаєвського флюсо-доломітного комбінату й можливі шляхи її поліпшення [Текст] / Е.В.Єрмакова. – Донецьк: ДонНТУ. – 2000. – С.1–11.
5. Волженский, А.В. Минеральные вяжущие вещества [Текст] / А.В. Волженский. – М.: Стройиздат, 1986. – С.70–99.
6. Сулименко, Л.М. Технология минеральных вяжущих материалов и изделий на их основе [Текст] / Л.М. Сулименко. – М.: Высш. шк., 2004. – 320 с.
7. Аль-Манасра Махер. Водостойкий магнезиальный цемент [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05; 05.17.11 / Аль-Манасра Махер; [Харьк. Автодорожный ин-т]. – Харьков: ХАДИ. – 1991. – 24 с.
8. Классен, В.К. Теоретическое обоснование и эффективность использования углеотходов в качестве сырьевого компонента в технологии цемента [Текст] / В.К. Классен, И.Н. Борисов, В.Е. Мануйлов, Е.И. Ходыкин // Строительные материалы. – 2007. – № 8. – С. 20–21.
9. Скляр, М.Г. Физико-химические основы спекания углей [Текст]. – М.: Metallurgy, 1984. – 200 с.
10. Чуханов, З.Ф. Процесс газификации кокса и проблема подземной газификации топлив [Текст]. – М.: АН СССР, 1957. – 332 с.
11. Шишаков, Н.В. Основы производства горючих газов [Текст]. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1948. – 480 с.
12. Утилизация отходов – экологичный путь ликвидации терриконов и отвалов [Текст] / В.И. Бабушкин, А.И. Здоров, И.В. Шульга, В.И. Винниченко // Цемент України. – 1998. – № 2. – С.28-29.
13. Бабушкин, В.И. Повышение эффективности использования отходов углеобогащения при обжиге цементного клинкера [Текст] / В.И. Бабушкин, В.И. Винниченко, И.В. Шульга // Уголь Украины. – 1998. – № 4. – С.48-49.
14. Швайка, Д.И. Использование отходов углеобогащения при производстве строительных материалов в УССР [Текст] // Использование отходов, попутных продуктов в производстве строительных материалов и изделий. Охрана окружающей среды. – М.: ВНИИЭСМ, 1985. – Сер. 11. – Вып. 2. – С. 43-51.
15. Boylu F. Effect of coal particle size distribution, volume fraction and rank on the rheology of coal-water slurries / F.Boylu, H.Dincer, G.Atesok // Fuel Processing Technology . – 85(2004). – P.241-250.
16. Atesok G. The effect of coal properties on the viscosity of coal-water slurries / G. Atesok, F.Boylu, A.A.Sirkeci, H.Dincer // Fuel. – 2002. – V.81. – P.1855–1858.
17. Бабушкин, В.И. Термодинамика силикатов [Текст] / В.И. Бабушкин, Г.М. Матвеев, О.П. Мчедлов-Петросян. – М.: Стройиздат, 1986. – 407 с.
18. Воробьев, Х.С. Теплотехнические расчеты цементных печей и аппаратов [Текст] / Х.С. Воробьев, Д.Я. Мазуров. – М., 1962. – С.312–324.

Ключевые слова: отсеб доломита, отходы обогащения угля, термодинамический анализ, дисоциация, реакция, карбонат магния, обжиг, клинкер.

Аннотації

Запропоновано комплексне використання відсіву доломіту й відходів збагачення вугілля для одержання доломітових в'язучих. Показано термодинамічну ймовірність зниження температури дисоціації карбонату магнію при участі вуглецю й продуктів його

термічної деструкції. Наведено теплотехнічні показники роботи обертової печі при використанні як альтернативного палива відходів збагачення: витрати теплової енергії, умовного палива й витрати відходів на випал.

Предложено комплексное использование отсева доломита и отходов обогащения углей для получения доломитовых вяжущих. Показана термодинамическая вероятность снижения температуры диссоциации карбоната магния при участии углерода и продуктов его термической деструкции. Приведены теплотехнические показатели работы вращающейся печи при использовании в качестве альтернативного топлива отходов обогащения: расход тепловой энергии, условного топлива и расход отходов на обжиг.

Proposed comprehensive use dropout dolomite and waste coal preparation for dolomite binders. Shows the thermodynamic probability reduce the dissociation temperature of magnesium carbonate, with the participation of carbon and products of its thermal degradation. Are heat-engineering performance of a rotating kiln, when used as an alternative fuel tailings: the heat energy of fuel consumption and waste burning.

УДК 691.41

*Кандидаты техн. наук Л.В. Трикоз,
О.С. Герасименко,
инж. И.А. Козеняшев*

*L.V. Trykoz, O.S. Gerasymenko,
I.A. Koznyashev*

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ ГРУНТОСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ

THEORETICAL BASISES OF THE SOIL CONTAINING MATERIAL

Представил д-р техн. наук, профессор А.А. Плугин

Введение. Для сооружения промышленных объектов, реконструкции и дальнейшего развития городов, строительства дорог, оросительных систем и других сооружений необходимо чрезвычайно большое количество строительных материалов. Для керамического производства необходимы специальные сорта глин, для бетонов на основе цемента – специальных заполнителей (крупных чистых песков, щебня, гравия). Месторождения таких материалов на территории нашей страны

размещены неравномерно. Следовательно, в стоимость большинства строительных материалов включены дополнительные затраты на перевозку сырьевых компонентов. В корне изменить существующее положение можно использованием сырья из местного наличия, а именно различных грунтов – песков, супесей, суглинков, лессов или смесей песков с суглинками и глинами. Проблема строительства из грунтов, как материалов местных, подручных, становится особенно актуальной.

Анализ предыдущих публикаций и исследований. Исследованиям свойств грунтов как возможных составляющих строительных материалов посвящено большое количество публикаций. В работе [1] были намечены возможные пути такого использования: кальцинирование, обработка кислотами, солями, смолами, белковыми компонентами. А глино-смоло-известковые блоки было предложено назвать терролитами. В работе [2] такие строительные материалы названы грунтосиликатами. Заполнителями в них являются дисперсные грунты, а связующим – грунтоцемент. Причем под этим термином понимается не смесь грунта с клинкерным цементом, а продукт совместного помола веществ алюмосиликатного состава, в том числе перечисленных грунтов, и несиликатных соединений щелочных металлов (едких щелочей, сульфидов, карбонатов, нитратов, фторидов, сульфатов, хлоридов и т.п.). Из грунтосиликатного бетона были изготовлены панели покрытий, восьмипустотные настилы, облицовка канала оросительной системы, лотки и плиты для облицовки канала, сантехнические кабины, безнапорные трубы. Отмечалось, что грунтосиликатные материалы имеют неисчерпаемую сырьевую базу в виде очень распространенных дисперсных грунтов, а также сырье для изготовления необходимых щелочных соединений в виде хлористых и сульфатных солей щелочных металлов. В работе [3] доказано, что из дисперсных грунтов наибольшую активность при взаимодействии с щелочами имеют глинистые минералы. Название «грунтоцементы» отображает цементирующие свойства («-цементы») за счет процессов в грунтах земной коры («грунто-»). В 1978 году рассматривалось твердение системы «каолинит-едкие щелочи» как развитие процесса полимеризации кремнекислородных цепей с переменным соотношением Si-O и

регулированием рН, в связи с чем назвали вяжущее «геополимером». Дальнейшее исследование грунтоцементов в научной школе Глуховского привело к объединению понятий «грунтоцементы» и «геополимеры» в «геоцементы» – клеющие растворы широкой номенклатуры с регулируемыми свойствами. В трудах [4] перечислено использование различных грунтов (пылеватых и глинистых песков, супесей и суглинков, лесса, осыпей известняка, сланцев, мелких морских песков и т.д.) как заполнителей грунтосиликатного бетона для изготовления широкой номенклатуры изделий: противофильтрационные и волнозащитные устройства в плотинах, дамбах и каналах, лотки, плиты облицовки каналов, седла, стойки, блоки, фундаментные плиты, стеновые панели, конструкции для морского противооползневого строительства. Здесь же – дорожные одежды из измельченного и перемешанного на месте грунта с добавлением вяжущего. В работе [5] описано устройство фундаментов из закрепленного цементом грунта. Такие фундаменты из цементогрунта имели марку 35-200 и по морозостойкости 25-1000 после тепло-влажностной обработки. В основе возможности создания цементогрунта – лежит физико-химическое взаимодействие глинистых минералов с цементом. На большую сырьевую базу указывалось и в работе [6]. Согласно [7] укрепленный грунт представляет собой материальную систему, в которой ее составные части – грунтовые зерна и связующие вещества – сохраняют свою химическую индивидуальность, а процессы физико-химического взаимодействия протекают главным образом на границах раздела фаз, поэтому авторы предлагают пользоваться термином не «укрепленные грунты», а «композиционные материалы на основе грунтов». На их взгляд, этот термин более удачен для тех случаев, когда укрепленный грунт рассматривается как строительный материал.

Цель статьи. Известно много различных теоретических основ почти по каждому применяемому вяжущему и заполнителю, однако обобщение этих теорий и выявление наиболее существенных сторон их взаимодействия не сделано. Важнейшей предпосылкой к разработке единой теории является преобладающая значимость (в количественном и качественном отношении) роли электроповерхностных явлений и структурных элементов разных уровней. Целью данной статьи является выявление единого структурного подхода к обеспечению прочности строительных материалов, для чего в статье будут проведены необходимые расчеты.

Новые результаты расчета структурных характеристик глин. Анализ структуры минералов глин дает основание представить их как конденсированную дисперсную систему, дисперсная фаза которой представлена частицами минерала, а дисперсионная среда – водой. Рассмотрим морфологические признаки двух основных типов глинистых материалов. Каолин имеет в основном частицы с размером до 2 мкм и незначительное количество (по объему) намного меньших частиц между ними. При невысокой влажности монтмориллонит имеет частицы несколько меньшие по

размеру, однако одного порядка с ними, и также небольшое количество намного меньших частиц. При увеличении влажности монтмориллонитовых глин большие по размерам частицы диспергируют, и глина становится субмикроскопической с размером частиц 45-90 нм (в среднем 68 нм = 6,8·10⁻⁸ м).

Глинистые грунты (глины, суглинки или супеси), состоящие из песчаной и глинистой составляющих, можно рассматривать как полидисперсную систему трех уровней: субмикроуровень (частицы глины размером в среднем 68 нм = 0,068 мкм), микроуровень (размер частиц глины составляет единицы микрометров) и мезоуровень (частицы глины и зерна песка размером в десятки и сотни микрометров). При этом часть глины распределяется на поверхности зерен песка одним монослоем, раздвигая их, а остальная – в тонких прослойках между зернами песка, пустоты между которыми заполняют остальные частицы глины.

С учетом этого структуру глинистых грунтов можно охарактеризовать, по аналогии с цементными растворами и их структурными характеристиками, данными в [8], коэффициентом раздвижки зерен песка μ и коэффициентом раздвижки частиц глины λ , соответственно:

$$\mu = \frac{V_{чг} + B}{V_{пвс}^п} = \frac{\frac{Гл}{\rho^{Гл}} + B}{\frac{П}{\rho_{НАС}^п} П_{пвс}^п} = \frac{\frac{Гл}{\rho^{Гл}} (1 + \frac{B}{Гл} \cdot \frac{\rho^{Гл}}{\rho^B})}{\frac{П}{\rho_{НАС}^п} П_{пвс}^п} = \frac{Гл \cdot \rho_{НАС}^п}{П \cdot П_{пвс}^п \cdot \rho^{Гл}} \cdot (1 + \frac{B}{Гл} \cdot \frac{\rho^{Гл}}{\rho^B}), \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{B}{V_{пвс}^{Гл}} = \frac{\frac{Гл \cdot W_{Гл}}{\rho_{НАС}^п} П_{пвс}^{Гл}}{П_{пвс}^{Гл}} \cdot \frac{W_{Гл} \cdot \rho_{НАС}^{Гл}}{П_{пвс}^{Гл}}, \quad (2)$$

где $V_{чг}$ – объем частиц глины, м³; $V_{пвс}^п$ – объем пустот песка, м³; B – объем воды в грунте, м³; $Гл$ – масса частиц глины, кг;

$\rho^{Гл}$ – плотность частиц глины, кг/м³; $П$ – масса частиц песка, кг; $\rho_{НАС}^п$ – насыпная плотность песка, кг/м³; $П_{пвс}^п$ – пус-

тотность песка, дол.ед.; ρ^B – плотность воды, кг/м³; $V^{ПлПлС}$ – объем пустот глины, м³; $W_{Гл}$ – влажность глины, дол.ед.; $\rho^{ПлНАС}$ – насыпная плотность глины, кг/м³; $П^{ПлПлС}$ – пустотность глины, м³.

Подставим усредненные характеристики глинистых грунтов в формулу (1). После подстановки ($\rho^{Пл} = 3000$ кг/м³, $\rho^{ПлНАС} = 1400$ кг/м³, $П^{ПлПлС} = 0,4$, $\rho^B = 1000$ кг/м³), выразив массу глины как долю от количества песка n и обозначив отношение массы воды к массе песка как влажность W , получим такой вид формулы (1):

$$\mu = \frac{n \cdot 1,4}{1,2} \cdot \left(1 + W \cdot \frac{3}{n}\right). \quad (3)$$

В зависимости от количества глинистой составляющей и воды возможны случаи $\mu < 1$, $\mu = 1$ и $\mu > 1$. При коэффициенте μ , большем 1, вода и глинистые частицы будут раздвигать частицы песка и заполнять пустоты. Произведем расчет коэффициента раздвижки зерен μ при различных значениях влажности W . Результаты расчета представлены на рисунке.

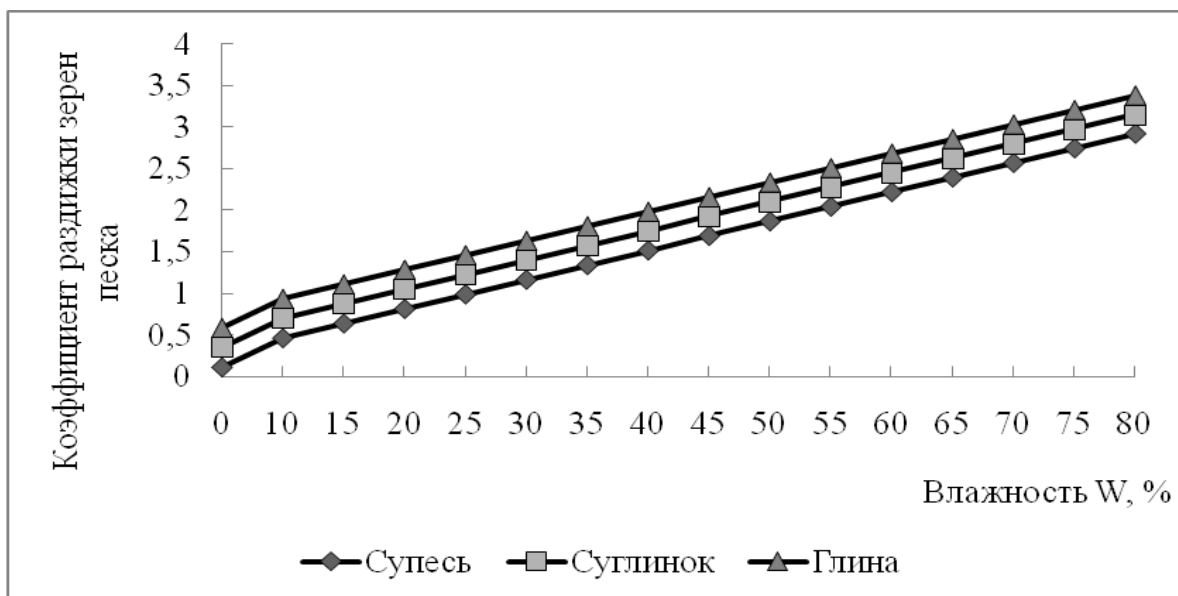


Рис. Зависимость μ от влажности

Анализируя представленные на рисунке данные, можно установить следующие закономерности. Увеличение количества глинистых частиц и воды в грунте приводит к увеличению толщины прослойки между частицами песка и, следовательно, к увеличению значения μ , что служит подтверждением корректности расчета. Коэффициент $\mu = 1$ соответствует влажности глинистых грунтов соответствующего вида на пределе усадки, $\mu = 2$ – на пределе раскатывания, $\mu = 3$ – на пределе текучести. Следовательно, данные

структурные характеристики могут быть использованы как при определении прочности закрепляемых грунтов, так и для прогнозирования состояния и устойчивости грунтовых массивов в целом.

Выводы и перспективы использования. Исходя из экономических соображений наибольшее значение в строительной практике будут иметь композиционные материалы на основе грунтов, в которых дефицитные и относительно дорогие вяжущие и добавки к ним используются в минимальных

объемах, а основную часть составляют те или иные отходы и побочные продукты промышленных предприятий. Исследование и анализ структурных характеристик грунтов показали, что эти материалы подобны между собой как по

прочностным, так и по деформационным свойствам. Отмеченное убеждает в объективности сформулированных теоретических положений о единстве природы процессов структурообразования в грунтах рассмотренной группы.

Список литературы

1. Будников, Е.П. Применение белковых стабилизаторов в строительстве из грунтов [Текст] / Е.П. Будников, А.А. Пеганов, В.В. Чернов // Сообщения института строительной техники Академии архитектуры СССР. – М., 1944. – Вып. 14. – 24 с.
2. Глуховський, В.Д. Грунтосилікатні вироби і конструкції [Текст] / В.Д. Глуховський. – К.: Будівельник, 1967. – 154 с.
3. Метакаолін в будівельних розчинах і бетонах: монографія [Текст] / Л.Й. Дворкін, Н.В. Лушнікова, Р.Ф. Рунова, В.В. Троян – К.: Вид-во КНУБіА, 2007. – 216 с.
4. Исследование и внедрение в производство грунтосиликатных материалов, конструкций и изделий [Текст] // Материалы II республиканской научно-технической конференции. – К., 1968. – 56 с.
5. Токин, А.Н. Фундаменты из цементогрунта [Текст] / А.Н. Токин. – М.: Стройиздат, 1984. – 184 с.
6. Каолины Украины: справочник [Текст] / Под.ред. Ф.Д. Овчаренко. – К.: Наук. думка, 1982. – 367 с.
7. Платонов, А.П. Композиционные материалы на основе грунтов [Текст] / А.П. Платонов, М.Н. Першин. – М.: Химия, 1987. – 144 с.
8. Основы теории твердения, прочности, разрушения и долговечности портландцемента, бетона и конструкций из них: в 3-х томах [Текст] / А.Н. Плугин, А.А. Плугин, Ал.А. Плугин и др. – К.: Наук. думка, 2012. – Т. 3. Теория прочности, разрушения и долговечности бетона, железобетона и конструкций из них. – 2012. – 287 с.

Ключевые слова: грунт, коэффициент раздвижки зерен, структура.

Аннотации

Проведено аналіз застосування ґрунтів як заповнювачів або в'язучих при створенні будівельних матеріалів і виробів з них. Показано, що теоретичною передумовою створення ґрунтовмісних матеріалів і забезпечення їх міцності і довговічності може бути структурний підхід на основі коефіцієнтів розсунення зерен піску частинками глини і води. Зроблено висновок про об'єктивність сформульованих теоретичних положень про єдність природи процесів структуроутворення в ґрунтах розглянутої групи.

Проведен анализ применения грунтов как заполнителей или вяжущих при создании строительных материалов и изделий из них. Показано, что теоретической предпосылкой создания грунтосодержащих материалов и обеспечения их прочности и долговечности может быть структурный подход на основе коэффициентов раздвижки зерен песка частицами глины и воды. Сделан вывод об объективности сформулированных теоретических положений о единстве природы процессов структурообразования в грунтах рассмотренной группы.

The analysis of the use of soils as binders or fillers to create building materials and products from them was done. It is shown that the theoretical premise of creating soil containing materials and to ensure their strength and durability may be a structural approach based on the coefficients of the move apart grains by the sand particles of clay and water. It is concluded that the objectivity formulated theoretical propositions about the nature of the unity of structure formation processes in soils examined group.

УДК 691.32:69.059.4

Канд. техн. наук Д.А.Плугін

D.A. Plugin

ЗАХИСТ КОНСТРУКЦІЙ ПАСАЖИРСЬКИХ ПЛАТФОРМ ВІД ЕЛЕКТРОКОРОЗІЇ ПІД ДІЄЮ СТРУМУ ВИТОКУ З РЕЙКОВОЇ КОЛІЇ

PROTECTION OF STRUCTURES PASSENGER PLATFORMS ELEKTROKORROZII UNDER LEAKAGE CURRENT TRACK

Представила д-р техн. наук, професор Г.М. Шабанова

Постановка проблеми. За статистичними даними про пасажирські платформи, що знаходяться на балансі підприємств БМЕС Укрзалізниці (за даними паспорта господарства БМЕС станом на 01.01.2011), на залізницях України експлуатується 2016 пасажирських платформ загальною площею 1744700 м². З них високих платформ – 362 загальною площею 332600 м². При поточному утриманні та нагляді в їх конструкціях виявляються пошкодження, розвиток яких призводить до передчасного виходу із ладу конструктивних елементів, зниження надійності, довговічності та безпеки експлуатації, вимагає їх частого ремонту або передчасної повної заміни конструкцій. Виникнення і розвиток пошкоджень часто обумовлені неврахуванням діючими нормативами дії струмів витоку з рейок на електрифікованих ділянках залізниць, ґрунтових вод, поперемінного заморожування та відтавання, вібраційних

дій, агресивних дій вантажів, що просипаються, недосконаліми складами бетону і конструкціями і т.п.

Метою досліджень є захист конструкцій пасажирських платформ на електрифікованих ділянках залізниць України від електрокорозії під дією струму витоку з рейкової колії.

Аналіз існуючих рішень. Вихідними матеріалами для досліджень є опубліковані праці [1÷5].

Нові експериментальні дослідження. Електрокорозійне руйнування бетонних і залізобетонних конструкцій пасажирських платформ визначається близькістю електрифікованої рейкової колії до платформи і особливостями конструкції платформи. Вони полягають в тому, що під платформою ґрунт є сухим, тому перетікання струму витоку у зону ґрунтів з найменшим опором (у землю) проходить через конструкції платформи, бетон і розчин у яких є хорошим провідником

електричного струму. Витікання струму витоку з конструкцій проходить по найкоротших шляхах з найменшим опором. Таким місцем є ближчий до колії торець бетонного блока-опори чи ближча залізобетонна опора-стійка. У період дощів по цьому місцю під дією постійного потенціалу на рейці виникає направлений потік катіонів кальцію Ca^{2+} , а за ними аніонів OH^- з бетону опори у землю, точніше у воду ґрунту, тобто протікає електрокорозійне вилуговування бетону. Але при цьому зростає концентрація цих іонів у воді ґрунту, і електроміграційний потік зупиняється, за рахунок чого зупиняється електрокорозійне вилуговування бетону. Процес вилуговування і руйнування таким чином бетону опори буде продовжуватися лише за умови відведення іонів з-під опори у ґрунт, іншими словами, коли виникає дифузійний

потік іонів від опори у ґрунт і потік розтікання іонів у ґрунті (за аналогією з опором розтікання струму у ґрунті).

При цьому загальний потік іонів, що виносяться з бетону опори і, відповідно, швидкість електрокорозії бетону визначаються швидкістю потоку розтікання іонів у ґрунті, який є досить вільним через невисокий коефіцієнт дифузії іонів у ґрунті.

На швидкість потоку розтікання іонів у ґрунті впливає вологість ґрунту, яка залежить від швидкості течії ґрунтових вод, а тому напору ґрунтових вод (відношення різниці рівнів ґрунтової води під платформою і у водоймищі до відстані між ними). Як відмічалось [1], розташування водоймища чи водотоку неподалік від платформи обумовлює прискорення такого потоку і, відповідно, прискорення виносу іонів з бетону опор, рис. 1.

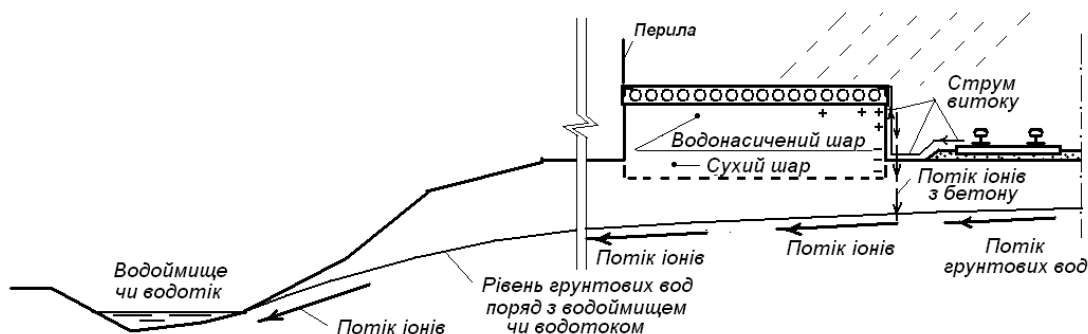


Рис. 1. Схема протікання струму витоку з рейок в конструкції платформи і виносу іонів з бетону у водоймище чи водотік

У зв'язку з цим при будівництві пасажирських платформ слід враховувати розташування у зоні кількох кілометрів річок чи водоймищ, і при їх небезпечній близькості рекомендуються способи захисту від електрокорозії як постійним, так і змінним струмом, що наведені далі.

Захист конструкцій пасажирських платформ від електрокорозії під дією струму витоку з рейкової колії за допомогою гідроізолюючого шару – корита. Схема гідроізолюючого шару-

корита наведена на рис. 2. Такий гідроізолюючий шар-корито можна влаштовувати і на експлуатованих платформах за допомогою горизонтального і вертикального (похилого) нагнітання гідроізолюючих матеріалів у ґрунт.

Захист конструкцій пасажирських платформ від електрокорозії під дією струму витоку з рейкової колії за допомогою захисного сталюого заземленого екрана. Захист за допомогою сталюого заземленого екрана складається

із сталеві пластини-екрана шириною 30÷40 см, товщиною 6÷8 мм, яка приварюється до заземлювачів з арматурних стержнів діаметром 10÷12 мм.

Стержні забиваються у землю на глибину до ґрунтових вод і не менше 1,5 м перед кожною бетонною або залізобетонною опорою, рис. 3.

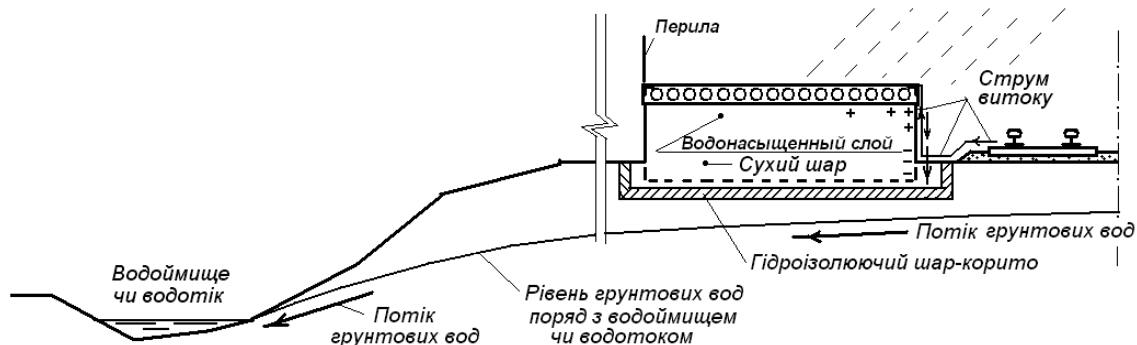


Рис. 2. Схема захисту конструкцій пасажирської платформи від електрокорозії за допомогою гідроізолюючого шару-корита

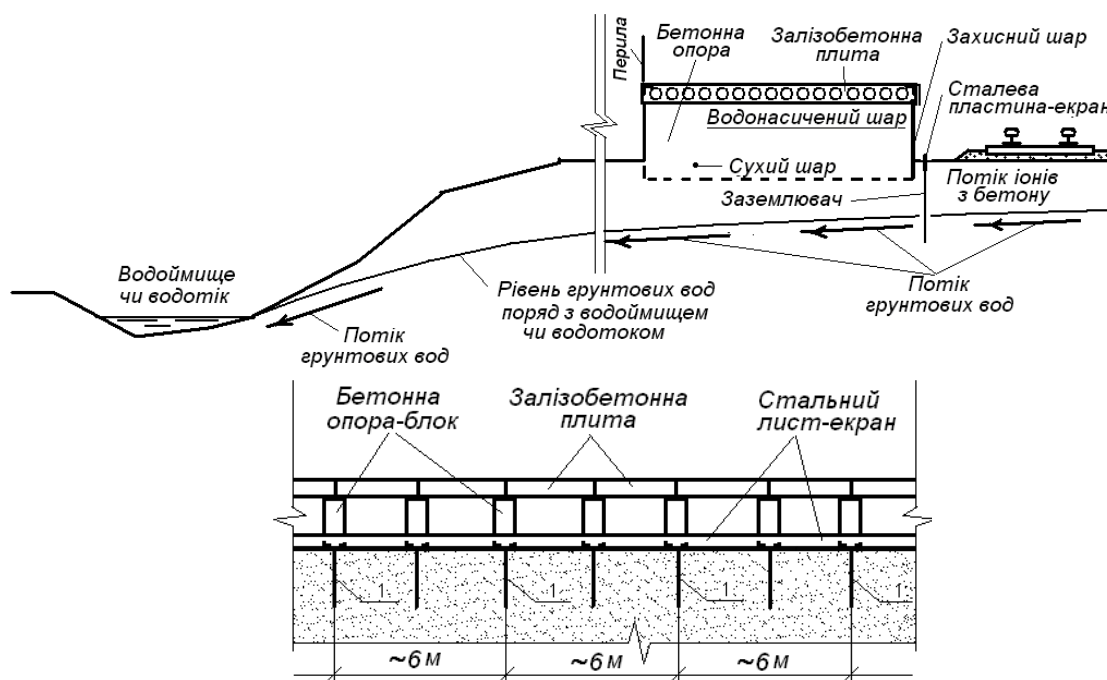


Рис. 3. Схема захисту конструкцій пасажирської платформи від електрокорозії за допомогою сталюого заземленого екрана

При глибокому розташуванні ґрунтових вод слід використовувати глибинні заземлювачі.

Торець блока слід захистити захисним складом типу ЗС-3Ц або ЗС-3МО.

Цілковито слід захистити таким складом кожні поверхні блоків (до

підшови) і поверхню залізобетонних плит під асфальтовим чи іншим покриттям.

Захист від електрокорозії конструкцій пасажирських платформ захисним екрануванням залізобетонних опор під плитами. Захист від електрокорозії конструкцій пасажирських

платформ можна здійснювати за допомогою захисного сітчастого екранування залізобетонних опор під плитами.

У порівнянні з листовими екранами сітчасті мають значно меншу вагу, зручні у виготовленні та експлуатації. Як екран рекомендується мідна сітка за ГОСТ 6613-86 з коміркою 0,55×0,56 мм, шириною 1000 мм, діаметром дроту 0,15 мм.

Для заземлення приймаються арматурні стержні, з'єднані з екраном та розташовані перпендикулярно площині екрана з кроком ~6 м.

Такий екран обмотується навкруги опори і закріплюється із заглибленням на 30÷40 см з виходом наверх до 50 см. Зверху екран вкривається захисним складом ЗС-ЗМЦ або ЗС-ЗМО у два шари.

Загальні рекомендації із захисту конструкцій пасажирських платформ від електрокорозії під дією струму витоку з рейкової колії. Використовувати для виготовлення бетонних і залізобетонних конструкцій тільки бетони оптимального складу з оптимальними характеристиками [6].

При будівництві нових платформ із збірних бетонних або залізобетонних

елементів використовувати тільки розчин оптимального складу [6].

Укривати відкриті металеві поверхні захисним електрокорозійностійким складом ЗС-ЗМЦ або ЗС-ЗМО.

Для надання естетичного вигляду поверхні елементів пасажирських платформ використовувати комплексне електрокорозійностійке покриття – перший шар – із складу ЗС-ЗМЦ або ЗС-ЗМО, другий шар (поверхневий) – із ЗС-1М, що має світлі кольори.

Висновки і галузь застосування.

Вперше запропоновано способи захисту конструкцій пасажирських платформ від електрокорозії під дією як постійного, так і змінного струму витоку з рейкової колії. Впровадження викладених рекомендацій на підприємствах служб будівельно-монтажних робіт і цивільних споруд дозволить запобігати пошкодженню і передчасному виходу з ладу конструкцій пасажирських платформ від дії струмів витоку, ґрунтових вод та інших факторів, підвищити їх надійність, довговічність та безпеку експлуатації, знизити експлуатаційні витрати.

Список літератури

1. Плугін, Д.А. Дослідження впливу водойм і водотоків на електрокорозію конструкцій пасажирських платформ [Текст] / Д.А. Плугін. – Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА; ХОТВ АБУ, 2013. – Вип. 71. – С. 254-259.
2. Плугін, А.А. Систематизація пошкоджень будівель та споруд станційних комплексів залізниць [Текст] / А.А. Плугін, Є.Г. Щур // Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті: зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2009. – Вип. 109. – С. 167-188.
3. Плугін, А.А. Аналіз впливу агресивних дій на конструкції та споруди залізниць: Промислові та цивільні будівлі та споруди [Текст] / А.А. Плугін, В.І. Наконечний, Є.Г. Щур [та ін.] // Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті: зб.наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2007. – Вип. 87. – С. 68-79.
4. Плугин, А.Н. Исследование влияния токов утечки и блуждающих токов на здания и сооружения, расположенные возле электрифицированных железнодорожных путей [Текст] / А.Н. Плугин, Ал.А. Плугин, А.А. Дудин [и др.] // Вестник НТУ «ХПИ»: сб. науч. трудов. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2009. – Вып. 40. – С. 88-104.

5. Плагин, А.Н. Блуждающие токи на конструкциях, зданиях и сооружениях, расположенных вблизи электрифицированных постоянным током участках железных дорог [Текст] / А.Н. Плагин, А.А. Плагин, О.А. Калинин [и др.] // Проблемы надёжности та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті: зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2009. – Вип. 109. – С. 131-143.

6. Спосіб визначення складу високоміцного, тріщиностійкого і водонепроникного бетону [Текст]: пат. 62613 UA Україна, МПК⁷ С 04 В 28/12 / А.М. Плагін, О.А. Калінін, С.В. Мірошніченко А.А. Плагін, С.М. Кудренко, В.А. Лютий, А.В. Никитинський, І.В. Подтележнікова, Г.О. Линник, М.Д. Костюк, В.О. Яковлев; заявник та патентовласник Укр. Держ. Акад. залізн. Тр-ту. – № 2003043396; опубл. 15.12.2003, Бюл. №12. – 3 с.

Ключові слова: пасажирські платформи, бетонні та залізобетонні конструкції, технічний стан, електрокорозія, захист від електрокорозії.

Анотації

Розглянуто механізм електрокорозії конструктивних елементів високих пасажирських платформ, розташованих на електрифікованих ділянках залізниць. Розроблено схему протікання струму витоку з рейок в конструкції платформи і виносу іонів з бетону у водоймище чи водотік. Вперше запропоновано способи захисту конструкцій пасажирських платформ від електрокорозії під дією як постійного, так і змінного струму витоку з рейкової колії.

Рассмотрен механизм электрокоррозии конструктивных элементов высоких пассажирских платформ, расположенных на электрифицированных участках железных дорог. Разработана схема протекания тока утечки с рельсов в конструкции платформы и выноса ионов из бетона в водоем или водоток. Впервые предложены способы защиты конструкций пассажирских платформ от электрокоррозии под действием как постоянного, так и переменного тока утечки с рельсового пути.

Considered the mechanism structural elements of high electrocorrosion passenger platforms located on the electrified-plots railways. Developed a scheme of the flow of leakage current from the rails in the construction of the platform and the removal of ions from the concrete pond or stream. First proposed ways to protect the passenger-ray structures of platforms from electrocorrosion action under both DC and AC current leakage from the rail tracks.

УДК 691.32

Канд. техн. наук А.А. Дудин

А.А. Dudin

**МЕХАНИЗМ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ
ОТРИЦАТЕЛЬНО ЗАРЯЖЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЧАСТИЦ
ГИДРОСИЛИКАТНОГО ГЕЛЯ НА КОЭФФИЦИЕНТ ДИФФУЗИИ
КАТИОНОВ Ca^{2+}**

**MECHANISM OF THE ELECTRIC FIELD EFFECT OF NEGATIVELY
CHARGED SURFACE OF THE PARTICLES HYDROSILICATE GEL
ON THE DIFFUSION COEFFICIENT OF Ca^{2+} CATIONS**

Представил д-р техн. наук, профессор А.А. Плугин

Введение. Механизмы воздействия переменного тока на бетонные, железобетонные и каменные конструкции многогранные и очень сложные, в силу чего мнения ученых разделились и являются зачастую полярными. Одной из причин этого является специфика процессов электрокоррозии бетона, железобетона и раствора в обводненных конструкциях, не укладывающаяся в рамки традиционной электрофизики и электротехники.

Анализ предыдущих публикаций и исследований. Наличие большого количества обводненных бетонных, железобетонных и каменных конструкций мостов, тоннелей, труб и других сооружений, подверженных интенсивной электрокоррозии, многогранность и вместе с тем взаимосвязанность различных теоретических аспектов обусловили проведение критического анализа литературных источников по следующим аспектам:

- оценка в трудах ученых и нормативных документах степени опасности электрокоррозии бетона и стали от действия переменного тока;

- механизм коррозии бетона и железобетона постоянным и переменным током.

Анализ литературных данных по вопросам оценки степени опасности электрокоррозии бетона и стали под влиянием переменного тока [2,3] показал отсутствие единства взглядов ученых и требований нормативных документов. Зачастую мнения ученых и нормативные документы являются несогласующимися, а часто противоречивыми.

Исследованию механизмов электрокоррозии бетона и железобетона под влиянием постоянных и переменным токов посвящены работы [4-10]. Следует отметить, что исследованиям в этой области посвящено незначительное количество работ, что, вероятно, связано с принятым мнением о слабом влиянии на бетон постоянных токов и полном отсутствии влияния переменных токов.

Целью исследования является раскрытие механизма влияния электрического поля отрицательно заряженной поверхности частиц гидросиликатного геля на коэффициент диффузии катионов Ca^{2+} .

Результаты исследований. В [1] представлены данные по зависимости коэффициента диффузии от В/Ц. Такая зависимость может быть обусловлена

уменьшением вязкости граничного слоя воды у поверхности частиц гидросиликатов кальция. В свою очередь, сильное уменьшение коэффициента диффузии может быть обусловлено связыванием ионов (уменьшением подвижности), в частности катионов Ca^{2+} , в электрическом поле отрицательно заряженной поверхности частиц гидросиликатного геля и структурированием воды в граничном слое этих частиц.

Рассмотрим более детально механизм проявления этих двух факторов.

$$u_{\text{ЭС}} = f \cdot (r_{H_2O} + r_{Ca^{2+}}) = \frac{ze^2 \cdot (r_{H_2O} + r_{Ca^{2+}})}{4\pi\epsilon\epsilon_0 \cdot (\delta_{GC})^2}. \quad (2)$$

Проанализируем возможность рассмотрения природы коэффициента диффузии ионов в бетоне на основе уравнения Эйнштейна для коэффициента диффузии D коллоидных частиц, а также первого закона Фика для диффузионного переноса вещества dn_i [1]

$$D = \frac{RT}{6\pi \cdot \eta \cdot r \cdot N_A}, \quad (3)$$

где RT – универсальная газовая постоянная, 8,31 Дж/(моль×К); η – вязкость воды, 0,001 Па×с; r – радиус частицы, м; N_A – число Авогадро ($6,02 \times 10^{23}$ 1/моль).

Применительно к 1 иону

$$D = \frac{kT}{6\pi \cdot \eta \cdot r}. \quad (4)$$

$$\delta_{GC} = \frac{\zeta \cdot \left[\frac{B}{\zeta} - \alpha \cdot \left(\frac{B}{\zeta} \right)_{XC} - \frac{V_{ПВС}^r}{\zeta} \right]}{\zeta \alpha \gamma^r s^r}, \quad (8)$$

Диффузия иона в граничном слое воды затормаживается под влиянием энергии взаимодействия между ионом Ca^{2+} и ПОИ OH^- на поверхности гелевой частицы. Энергия этого взаимодействия [11]

$$f_{\text{ЭС}} = \frac{ze^2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 \cdot (\delta_{GC})^2}. \quad (1)$$

Работа, которую совершает ион при его отрыве от молекулы воды,

По аналогии с (4.14) коэффициент диффузии катиона Ca^{2+} в граничном слое воды определится выражением

$$D_{GC} = \frac{u_{\text{ЭС}}}{6\pi \cdot \eta \cdot r_A}, \quad (5)$$

Разделим (4) на (5)

$$\frac{D_{GC}}{D} = \frac{u_{\text{ЭС}} \cdot 6\pi \cdot \eta \cdot r_{КАТ}}{6\pi \cdot \eta \cdot r_{КАТ} \cdot kT} = \frac{u_{\text{ЭС}}}{kT}, \quad (6)$$

откуда

$$D_{GC} = D \frac{u_{\text{ЭС}}}{kT}. \quad (7)$$

Величину δ_{GC} в уравнении (2) определим путем деления объема воды на частицах геля на площадь поверхности гидросиликатного геля

где $(B/C)_{xc}$ – водоцементное отношение, соответствующее химически связанной в цементе воде; α – степень гидратации цемента (0,5); γ^{Γ} – доля гидросиликатного геля в продуктах гидратации цемента (0,75); s^{Γ} – удельная поверхность гидросиликатного геля (200–700 м²/г).

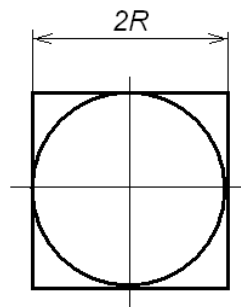


Рис. 1. Схема для определения пористости гидросиликатного геля

Пористость геля, имеющего сферическую форму частиц, можно определить геометрически по схеме рис. 1.

$$Пор^{\Gamma} = \frac{8R^3 - \frac{4}{3}\pi R^3}{8R^3} = \frac{8R^3 - 4,187R^3}{8R^3} = \frac{3,813}{8} = 0,48.$$

Средняя плотность геля равна

$$\rho_{CP}^{\Gamma} = \rho^{\Gamma} \cdot (1 - Пор^{\Gamma}), \quad (9)$$

Соответственно,

$$\rho_{CP}^{\Gamma} = 2,7 \cdot (1 - 0,48) = 1,4 \text{ г/см}^3.$$

где ρ^{Γ} – плотность гидросиликатного геля (2,7 г/см³ [123]).

Выразим объем пор в геле через расход цемента

$$\frac{V_{ПОР}^{\Gamma}}{C} = \frac{0,48 \Gamma / \rho^{\Gamma}}{C} = \frac{0,48 \cdot C \alpha \gamma^{\Gamma}}{\rho_{CP}^{\Gamma} \cdot C} \left(\frac{z}{z / \text{см}^3 \cdot z} = \frac{\text{см}^3}{z} \right). \quad (10)$$

Подставим $\alpha = 0,5$; $\gamma^{\Gamma} = 0,75$; $s^{\Gamma} = 700$ м²/г, как для высокоосновного (наиболее дисперсного) гидросиликатного геля,

$$\frac{V_{ПОР}^{\Gamma}}{C} = \frac{0,48 \cdot 0,5 \cdot 0,75}{1,4} = 0,129 \left(\frac{\text{см}^3}{z} \right).$$

Соответственно, толщина граничного слоя воды определится выражением

$$\delta_{ГС} = \frac{(B/C - 0,5 \cdot 0,23 - 0,129) \left(\frac{\text{см}^3 / z}{\text{см}^2 / z} \right)}{0,5 \cdot 0,75 \cdot 700 \cdot 10^4} = 3,8 \cdot 10^{-9} \cdot \left(\frac{B}{C} - 0,25 \right) (\text{м}) \quad (11)$$

На рис. 2 представлен график изменения толщины слоя воды на поверхности частиц гидросиликатного геля в зависимости от В/Ц бетона, построенный по этому уравнению. Согласно этому

графику слой воды являются очень тонкими (до 2 нм), что позволяет считать их граничными, в которых вода связана поверхностью частиц.

Упростим выражение (2):

$$u_{\text{ЭС}} = \frac{2 \cdot 2,56 \cdot 10^{-38} \cdot (1,4 + 1) \cdot 10^{-10}}{1,116 \cdot 10^{-10} \cdot \varepsilon \cdot 3,8^2 \cdot 10^{-18} \cdot (B/\text{Ц} - 0,25)^2} = \frac{0,76 \cdot 10^{-20}}{\varepsilon \cdot (B/\text{Ц} - 0,25)^2}. \quad (12)$$

С учетом (12) выражение (7) для $D_{\text{ГС}}$ принимает вид

$$D_{\text{ГС}} = D \cdot \frac{0,76 \cdot 10^{-48}}{\varepsilon \cdot (B/\text{Ц} - 0,25)^2 \cdot kT} = D \cdot \frac{0,76 \cdot 10^{-20}}{\varepsilon \cdot (B/\text{Ц} - 0,25)^2 \cdot 4,11 \cdot 10^{-21}} = D \cdot \frac{1,85}{\varepsilon \cdot (B/\text{Ц} - 0,25)^2}. \quad (13)$$

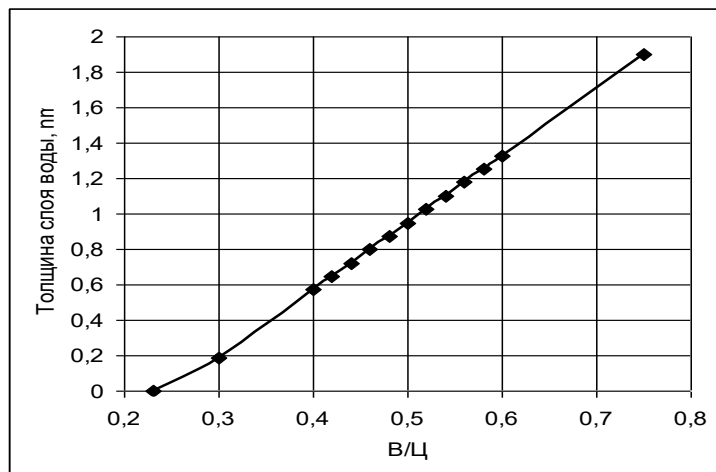


Рис. 2. Зависимость толщины слоя воды на поверхности частиц от В/Ц бетона

Вода в свободном состоянии обладает высокой диэлектрической проницаемостью, в пределах 80–81. Это обусловлено тетраэдрическим строением ее молекул с параллельным ориентированием при этом молекулярных диполей. Несмотря на значительное количество работ по образованию более крупных ассоциатов воды (кластеров), первичной ячейкой квазиструктуры воды признаются ассоциаты, содержащие от трех до шести молекул воды (тримеры, тетраметры, пентаметры и гексаметры воды).

Однако в граничном слое ее диэлектрическая проницаемость уменьшается вплоть до высокочастотной диэлектрической проницаемости, близкой к 2. Это уменьшение обусловлено структури-

рующим влиянием поверхности на свойства воды [12].

Теория диэлектрической проницаемости воды объясняет ее высокое значение за счет взаимного ориентирующего влияния полярных молекул. На основе учета 5-молекулярного ассоциата с параллельными дипольными моментами молекул воды в [13] выведена формула, которая дает расчетную величину диэлектрической проницаемости воды (и других полярных жидкостей), близкую к экспериментальным результатам.

В граничных слоях на молекулы воды оказывает сильное влияние электрическое поле поверхности. Исходя из этого, выведена формула для диэлектрической проницаемости воды в граничном слое, которая имеет следующий упрощенный вид [13]:

$$\varepsilon_{\text{ГС}} = 2,16 + 1,28 \cdot \frac{\delta}{\psi_{\text{ЭП}}^P} \left[1 - \exp\left(-\frac{75,5 \cdot \psi_{\text{ЭП}}^P}{\delta}\right) \right], \quad (14)$$

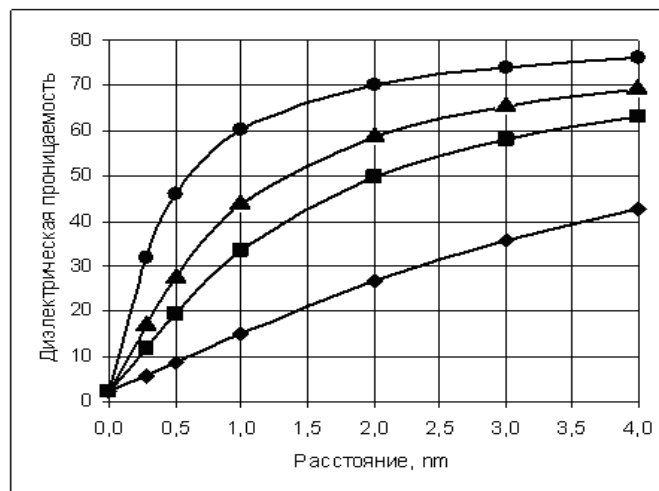
где δ – расстояние от поверхности частицы, Å; $\psi_{ЭП}^P$ – равновесный электроповерхностный потенциал частицы, В; 2,16 – величина высокочастотной диэлектрической проницаемости воды, т.е. предельно связанной непосредственно у поверхности частицы.

В табл. 1 и на рис. 3 представлены зависимости диэлектрической проницаемости воды в граничных слоях $\epsilon_{ГС}$ от расстояний δ от поверхности для различных электроповерхностных потенциалов, характеризующих гидросиликаты кальция ГСК различной основности (чем выше абсолютная величина потенциала, тем ниже основность ГСК [13]).

Определяя и подставляя в (13) величины В/Ц и ϵ , выполнен расчет коэф-

фициентов диффузии катионов Ca^{2+} в бетонах для $D = 1,15 \text{ см}^2/\text{с}$ (для концентрации гидроксида кальция в бетоне 0,02 моль/л, табл. 2). По данным этой таблицы построен соответствующий график изменения $D_{ГС}$ для различных В/Ц бетона (рис. 4, сплошная линия – расчетная зависимость, пунктирная линия – экспериментальная).

Высокая степень совпадения расчетной кривой, как по характеру изменения, так и по абсолютным величинам, с экспериментальными данными для бетона свидетельствует о корректности количественного описания механизма диффузии катионов Ca^{2+} в граничном слое воды.



—◆— 1 В; —■— 0,37 В; —▲— 0,24 В; —●— 0,11 В

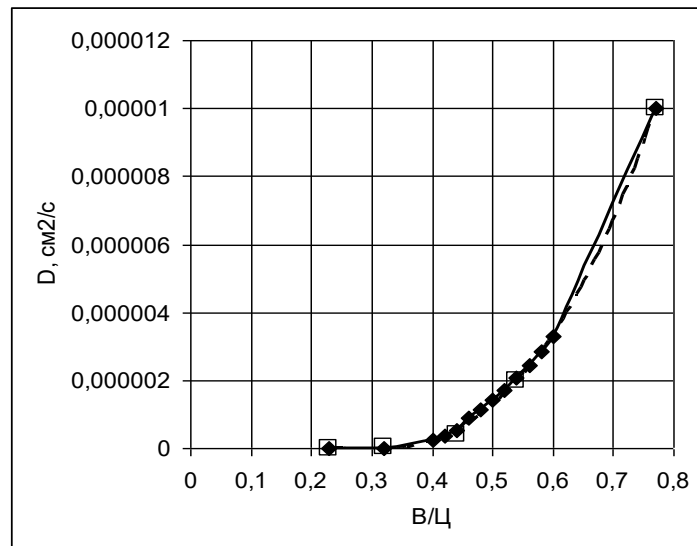
Рис. 3. Зависимость ϵ воды в граничных слоях от расстояния до поверхности частиц

Таблица 1

Данные расчета диэлектрической проницаемости воды в граничном слое по формуле (14) без учета водородных связей

Расстояние, нм	Равновесный электроповерхностный потенциал $\psi_{ЭП}^P$, В			
	1В	0,37	0,24	0,11
1	2	3	4	5
0,0	2,2	2,2	2,2	2,2
0,3	5,7	11,8	17,0	32,0
0,5	8,6	19,3	27,5	45,8
1,0	14,9	33,4	43,7	60,3
2,0	26,7	49,7	58,7	70,2
3,0	35,8	58,2	65,4	74,0

1	2	3	4	5
4,0	42,7	63,2	69,2	76,1
5,0	48,0	66,5	71,6	77,3
10,0	61,9	74,0	76,9	79,9
20,0	71,2	78,1	79,7	81,3
30,0	74,8	79,6	80,7	81,7
40,0	76,6	80,4	81,2	82,0
50,0	77,8	80,8	81,4	82,1
60,0	78,6	81,1	81,6	82,2
80,0	79,6	81,5	81,9	82,3
100,0	80,2	81,7	82,0	82,4



—◆— расчетная кривая; —□— данные СНиП и экспериментальные из литературных источников [14]

Рис. 4. Зависимость коэффициента диффузии бетона от В/Ц

Таблица 2

Расчетные и экспериментальные величины коэффициента диффузии ионов Ca^{2+} в бетоне с различными В/Ц

В/Ц	$D_{гс}$, (расчетная), $см^2/с$	D бетона, $см^2/с$	В/Ц	$D_{гс}$, (расчетная), $см^2/с$	D бетона, $см^2/с$
0,23	4,5954E-10	0	0,5	$1,41215 \times 10^{-6}$	
0,32	1,9529E-08	0,000000051	0,52	$1,7181 \times 10^{-6}$	
0,40	2,34297E-07		0,54	$2,05724 \times 10^{-6}$	0,000002
0,42	3,57952E-07		0,56	$2,42988 \times 10^{-6}$	
0,44	5,13506E-07	0,0000004	0,58	$2,83624 \times 10^{-6}$	
0,46	8,98318E-07		0,6	$3,27652 \times 10^{-6}$	
0,48	1,13904E-06		0,77	$1,00137 \times 10^{-5}$	0,00001

Выводы и перспективы использования. Выявленный и представленный количественно механизм влияния электрического поля отрицательно заряженной поверхности частиц гидросиликатного геля на коэффициент

диффузии катионов Ca^{2+} в граничном слое воды даёт возможность рассмотрения процессов, которые происходят в обводнённых бетонных, железобетонных и каменных конструкциях, которые включены в цепь переменного тока «рельс-земля».

Список литературы

1. Дудин, А.А. Усовершенствование классификации бетонов по водопроницаемости [Текст] / А.А. Дудин // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА; ХОТВ АБУ, 2013. – Вип. 71. – С. 268-272.
2. ДБН В.2.3-14:2006 Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування [Текст] / НТУ. – К.: Мінбудархжиткомгосп, 2006. – 359 с.
3. ЦЭ 3551 Инструкция по защите железнодорожных подземных сооружений от коррозии блуждающими токами [Текст] / МПС СССР. – М.: Транспорт, 1979. – 89 с.
4. Плугин, Ал.А. Влияние постоянного тока на бетон обводненных конструкций и сооружений, расположенных вблизи электрифицированных железнодорожных путей [Текст]: дисс. ... канд. техн. наук / Ал.А. Плугин. – Харьков: УкрГАЖТ, 2010. – 256 с.
5. Борзяк, О.С. Механизм электрокоррозии бетона железобетонных конструкций в сложных условиях эксплуатации [Текст]: дисс. ... канд. техн. наук / О.С. Борзяк. – Харьков: УкрГАЖТ, 2010. – 240 с.
6. The NACE Annual Conference and Corrosion Show, 11–15.03.1995, Cincinnati Convention Center, Cincinnati, Ohio. – 1995. – P.519.
7. Старосельский, А.А. Коррозия и долговечность железобетона в условиях электрических воздействий [Текст]: дисс. ... д-ра техн. наук / А.А. Старосельский. – Харьков: ХИИТ, 1989. – 282 с.
8. Котельников, А.В. Блуждающие токи электрифицированного транспорта [Текст] / А.В. Котельников. – М.: Транспорт, 1986. – 279 с.
9. Старосельский, А.А. Электрокоррозия железобетона [Текст] / А.А. Старосельский. – К.: Будівельник, 1978. – 168 с.
10. Артамонов, В.С. Защита от коррозии железобетона транспортных сооружений [Текст] / В.С. Артамонов, Г.М. Молгина. – М.: Стройиздат, 1976. – 192 с.
11. Губкин, А.Н. Физика диэлектриков [Текст] / А.Н. Губкин. – М.: Высшая школа, 1971. – 272 с.
12. Багоцкий, В.С. Основы электрохимии [Текст] / В.С. Багоцкий. – М.: Химия, 1988. – 400 с.
13. Плугин, А.Н. Электрогетерогенные взаимодействия при твердении цементных вяжущих [Текст]: дисс. ... д-ра хим. наук / А.Н. Плугин. – Харьков: ХИИТ, 1989. – 282 с.
14. Технология изготовления железобетонных шпал [Электронный ресурс]. – www.rostov-invest.ru/index.php?id=2.

Ключевые слова: механизм, бетон, цемент, диффузия, вода, расчет.

Аннотации

Наведено механізм впливу електричного поля негативно зарядженої поверхні часток гідросилікатного гелю на коефіцієнт дифузії катіонів Ca^{2+} . Виведено формулу для

діелектричної проникності води в граничному шарі. Представлено залежності діелектричної проникності води в граничних шарах від відстаней від поверхні для різних електроповерхневих потенціалів, що характеризують гидросилікати кальцію ГСК різної основності. Розраховано величини коефіцієнта дифузії іонів Ca^{2+} у бетоні з різними В/Ц.

Представлен механізм впливу електричного поля негативно зарядженої поверхні частиц гидросилікатного геля на коефіцієнт дифузії катионів Ca^{2+} . Виведена формула для діелектричної проникності води в граничному шарі. Представлені залежності діелектричної проникності води в граничних шарах від відстаней від поверхні для різних електроповерхневих потенціалів, характеризують гидросилікати кальцію ГСК різної основності. Рассчитаны величини коефіцієнта дифузії іонів Ca^{2+} в бетоні з різними В/Ц.

Represent the mechanism of the effect of the electric field of a negatively charged particle surface hydrosilicate gel on the diffusion coefficient of the cations Ca^{2+} . The formula for the dielectric constant of the water in the boundary layer. The dependencies of the dielectric constant of the water in the boundary layers of the distance from the surface for different surface electrical potentials characterizing calcium hydrosilicates GSK different basicity. The values of the diffusion coefficient of Ca^{2+} in the concrete with different W/C.

УДК 691.3

*Д-р хим. наук А.Н. Плугин,
д-р техн. наук А.А. Плугин,
канд. техн. наук Ал.А. Плугин,
асп. А.А. Конев (УкрГАЗТ),
инж. А.А. Забияка (Укрзалізниця)*

*A.N. Plugin, A.A. Plugin, Al.A. Plugin,
A.A. Konev, A.A. Zabiyaка*

ВНУТРЕННИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В БЕТОНЕ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ НА НЕГО: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

INTERNAL STRESSES IN THE CONCRETE DUE TO THE ELECTRIC IMPACT ON HIM: AN EXPERIMENTAL STUDY

Введение. Как известно [1, 2], на электрифицированном постоянным током рельсовом пути железных дорог, трамвайных линий и путях метрополитенов возникает пульсирующий однонаправленный постоянный ток утечки, оказывающий сильное разрушающее

воздействие на бетон обводненных конструкций зданий и сооружений, которые близко расположены к путям.

Одним из таких разрушений является образование в бетоне опасных трещин в результате возникновения в нем растягивающих напряжений при

выщелачивании продуктов гидратации цементного вяжущего.

Цель и задачи исследования.

Настоящая статья посвящена исследованию влияния пульсирующего однонаправленного постоянного тока утечки на напряжения и деформации обводненного бетона.

Для исследования влияния пульсирующего однонаправленного постоянного тока на возникновение в обводненном бетоне напряжений и трещин выполнены соответствующие исследования. Методика исследований заключается в пропуске указанного тока через бетонный образец (куб, призма), погруженный в проточную воду, и одновременном измерении напряжений и деформаций в образце с помощью мостовой измерительной схемы, рис. 1 [3].

В этой схеме (рис. 1) сопротивление R_x – проволочный датчик линейных деформаций, R_2 и R_3 – постоянные

сопротивления в плечах измерительного моста, R_1 – переменное сопротивление (магазин сопротивлений) для уравнивания моста, $R_{вн}$ – внутреннее сопротивление мультиметра. Сопротивления R_2 и R_3 могут быть изготовлены из такой же константовой проволоки или набраны на магазинах сопротивления.

Проволочный датчик линейных деформаций R_x изготавливается путем наматывания константовой проволоки в 5 витков на поверхности исследуемого бетонного образца-куба $100 \times 100 \times 100$ мм с оклеиванием проволоки эпоксидной смолой (рис.2). Общая длина рабочего участка проволоки равна, соответственно, 200 см. На питающую диагональ AD подается напряжение питания $U_0 = 4,8$ В от источника постоянного тока. В измерительную диагональ включается мультиметр Sanwa PC-510 с высоким входным сопротивлением, измеряющий ток I в микроамперах.

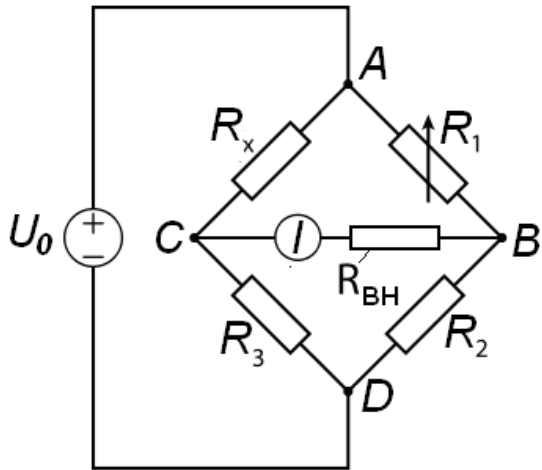


Рис. 1. Мостовая измерительная схема



Рис. 2. Датчик из константовой проволоки

Мост является неравновесным, он выставлен перед экспериментом в равновесное состояние с помощью магазина сопротивлений R_1 и показывает величину тока, возникающего при увеличении сопротивления R_x .

Увеличение этого сопротивления возникает при деформировании бетонного куба, испытываемого под прессом или в результате растягивающих напряжений внутри цементного камня под воздействием постоянного тока, при этом датчик

растягивается, приобретая дополнительное сопротивление ΔR , Ом.

Соответственно, на измерительной диагонали возникает пропорциональное по величине напряжение

$$U_{ИЗМ} = I_{ИЗМ} \cdot R_{ВН}. \quad (1)$$

Величина $U_{ИЗМ}$ определяется известным уравнением

$$U_{ИЗМ} = U_0 \cdot \left(\frac{R_x}{R_3 + R_x} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right). \quad (2)$$

$$I_{ИЗМ} \cdot R_{ВН} = U_0 \cdot \left(\frac{R_0 + \Delta R}{R_0 + R_0 + \Delta R_x} - \frac{R_0}{R_0 + R_0} \right) \quad (4)$$

Величина ΔR пренебрежимо мала по сравнению с R_0 , в связи с чем

$$\begin{aligned} U_{ИЗМ} &= I_{ИЗМ} \cdot R_{ВН} = U_0 \cdot \left(\frac{R_0 + \Delta R}{R_0 + R_0} - \frac{R_0}{R_0 + R_0} \right) = \\ &= U_0 \cdot \left(\frac{R_0 + \Delta R - R_0}{R_0 + R_0} \right) = U_0 \cdot \left(\frac{\Delta R}{R_0 + R_0} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

Следовательно,

$$I_{ИЗМ} = \frac{\Delta R \cdot U_0}{(R_0 + R_0) \cdot R_{ВН}}. \quad (6)$$

Как видим, напряжение на измерительной диагонали $U_{ИЗМ}$ и соответствующий ему ток $I_{ИЗМ}$ пропорциональны величине дополнительного сопротивления ΔR , в свою очередь пропорционального деформации датчика.

Для количественной оценки измеряемых деформаций датчика найдена зависимость между измеренным током и его сопротивлением. С этой целью вместо

Мостовая схема собрана на сопротивлениях R_2 и R_3 в плечах моста одинаковой величины R_0 . Начальное сопротивление R_x и магазина сопротивлений R_1 имеют близкие к ней величины.

Для упрощения обозначим

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_x = R_0, \quad (3)$$

а изменяющуюся величину сопротивления датчика ΔR . С учетом этого и равенства (3) уравнение (2) приобретает вид

датчика в мостовую схему включали магазин сопротивления, и на нем набирали различные сопротивления R_1 в пределах от 0,01 Ом до 100 Ом (меньше и больше сопротивления R_0), имитируя этим сопротивление датчика.

Данные измерений представлены в таблице и на графике, рис. 3.

Согласно этому графику наблюдается линейная зависимость в интервале от 10 до 100 Ом, а при сопротивлениях менее 1 Ом ток становится постоянным и пересекает ось ординат в точке, которой соответствует сопротивление 12,8 Ом. Это и есть внутреннее сопротивление мультиметра (Sanwa PC-510) $R_{ВН} = 12,8$ Ом.

Таблица

Данные напряжений сжатия в бетонном образце-кубе и измеренного тока

Сопротивление в плече моста, Ом	Измеренный ток, мкА	Расчетное сопротивление $R=U/I \cdot 10^6$, Ом
100	45000	106,67
50	87000	55,17
10	344000	13,95
1	373000	12,87
0,1	375000	12,80
0	375100	12,79

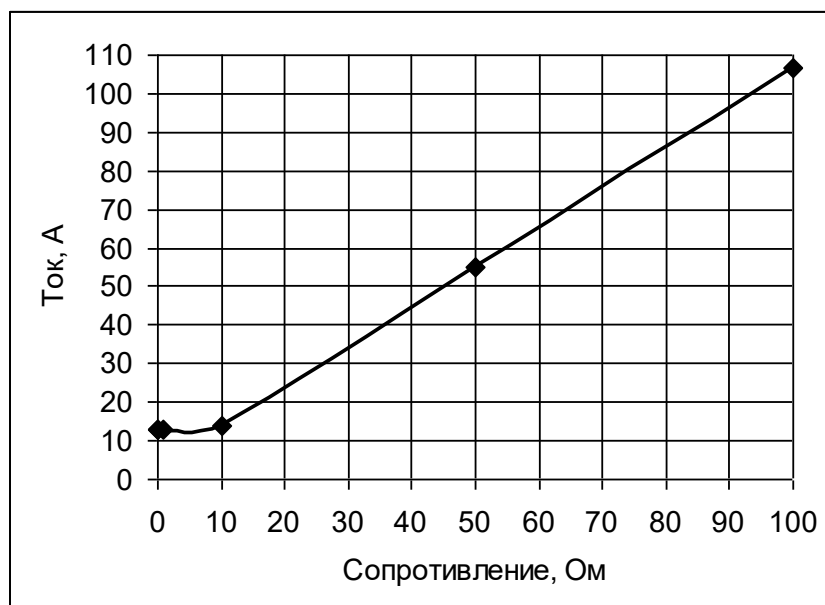


Рис. 3. Зависимость между сопротивлением в плече моста R_1 и измеренным током в измерительной диагонали

Для тарировки датчика по механическим напряжениям бетонный образец-куб с датчиком посередине его высоты нагружали различными усилиями под прессом, рис. 4, а, и определяли возникающий в образце и, соответственно, в измерительной диагонали моста ток, рис. 4, б.

По данным измерений построили график зависимости тока от напряжений сжатия, рис. 5, а. Как видно, при увеличении напряжения сжатия ток возрастал по восходящей кривой. При достижении напряжения 33,9 МПа и тока 21 мкА датчик из константановой

проволоки разорвался, чему соответствует резкий рост тока за пределы рабочей шкалы.

Подобный характер зависимости между напряжением и током с разрывом проволочного датчика повторился и для бетонных образцов более низкой прочности, рис. 5, б. Это однозначно свидетельствует о высокой информативности проволочного тензодатчика в виде намотанной константановой проволоки и возможности его использования для измерения напряжений, деформаций и трещинообразования в бетоне от действия тока.



Рис. 4. Тарировка датчика из константановой проволоки: а) нагружение бетонного образца-куба под прессом; б) регистрация изменения сопротивления при деформировании бетонного куба под прессом

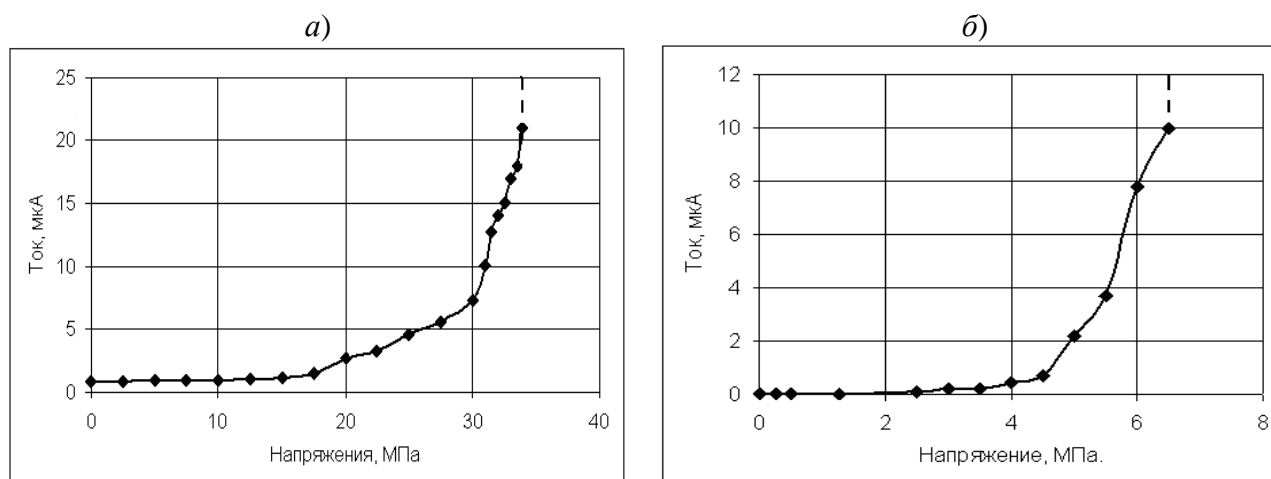


Рис. 5. Зависимость между напряжением сжатия под прессом и током в бетонном образце 100x100x100 мм

Для исследования влияния электрического напряжения на деформации бетонных образцов-кубов при их формировании на открытую поверхность бетона устанавливали стальную пластину-электрод с отверстиями. На затвердевшие образцы-кубы наматывали и обклеивали эпоксидной смолой по три аналогичных константановых датчика – сверху, посередине и внизу куба, обозначая эти положения в маркировке датчиков: верх – 1,

середина – 2 и низ – 3. Боковые поверхности кубов покрывали в два слоя водонепроницаемым электрокоррозионно-стойким защитным составом ЗС-3 (каменноугольная смола, эпоксидная смола и цемент в отношении 0,6:0,4:1). Каждый приготовленный таким образом образец помещали в металлическую емкость с проточной водой из водопровода, присоединяя концы проволоочного датчика в соответствующее плечо мостовой

измерительной схемы. Исследования деформаций в бетонных образцах от приложенного к ним напряжения выполнены путем наложения на бетонный образец пульсирующего постоянного

напряжения величиной 80 В, рис. 6, создаваемого с помощью специальной автоматической установки [4], в течение длительного времени.

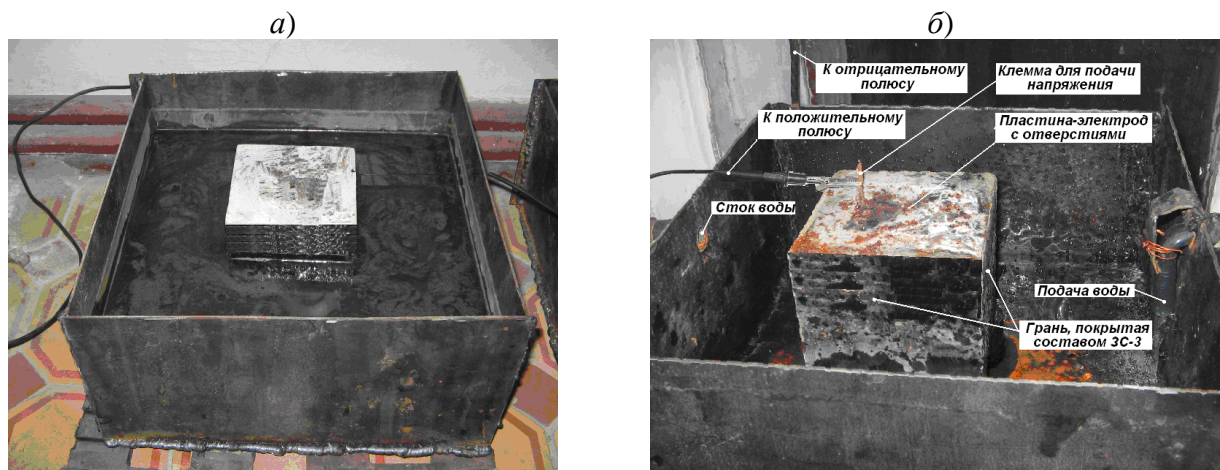


Рис. 6. Бетонный образец-куб: а) контрольный, в емкости со стоячей водой; б) исследуемый, в емкости с проточной водой

На рис. 7 представлен график изменения во времени тока, возникающего в измерительной диагонали образца.

Изменение тока в пределах 220 часов для всех датчиков имеет одинаковый характер, а также дальнейшее изменение тока до 350 часов для датчиков 3-2 (середина) и 3-3 (верх), рис. 7, б и в, имеет в общем тоже одинаковый характер и синхронность. Однако после 350 часов ток в датчике 3-2 (середина образца) уменьшается до минимума, и остается таковым вплоть до 680 часов. В это же время ток в датчике 3-3 растет, а значит, растяжение в нижней части образца продолжает увеличиваться. После этого в обоих датчиках ток резко двумя синхронными скачками возрастает. Характерно при этом, что скачкообразное изменение в среднем датчике происходило вокруг первичного тока (в начальной стадии обработки), в то время как в нижнем датчике ток постоянно возрастал и значительно превышал его начальные

значения колебания. К 900 часам проволока датчика 3-2 разорвалась, а датчик 3-3 продолжал оставаться целым. В течение дальнейших примерно 1000 часов, или около 1,5 месяцев, рис. 7, г, он показывал ток и деформации образца, которые периодически изменялись с достаточно большой амплитудой вокруг среднего уровня тока (около 140 мкА). К 1975 часам воздействия на образец напряжения оборвалась проволока и этого датчика.

Характерно, что при резком возрастании ток достигал в различных датчиках различных образцов одной и той же величины – примерно 25000 мкА. Кроме того, ток $I_{изм}$ для датчика 3-1 резко увеличивался до максимума трижды, каждый раз возвращаясь к исходным значениям, рис. 8, а. Происходило также резкое возрастание сопротивления этого датчика, с той лишь разницей, что его максимальные величины не были одинаковыми, а изменялись в пределах 1-1,8 МОм, рис. 8, б.

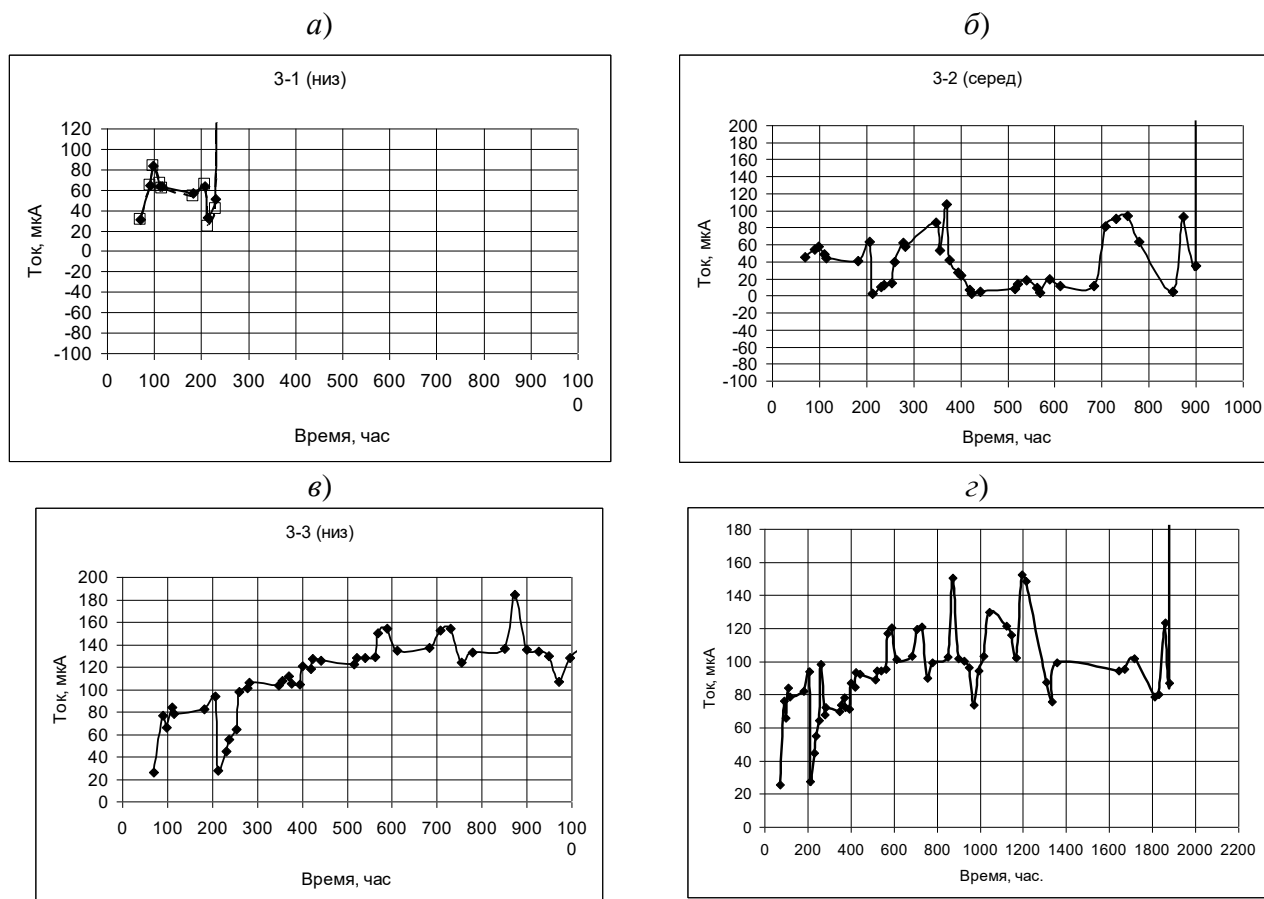


Рис. 7. Изменение тока в измерительной диагонали моста с датчиками, установленными на бетонном образце 100x100x100 мм при наложении на него пульсирующего постоянного напряжения в течение длительного времени: а) 3-1 – датчик вверху образца; б) 3-2 – датчик посередине образца; в), г) 3-3 – датчик внизу образца

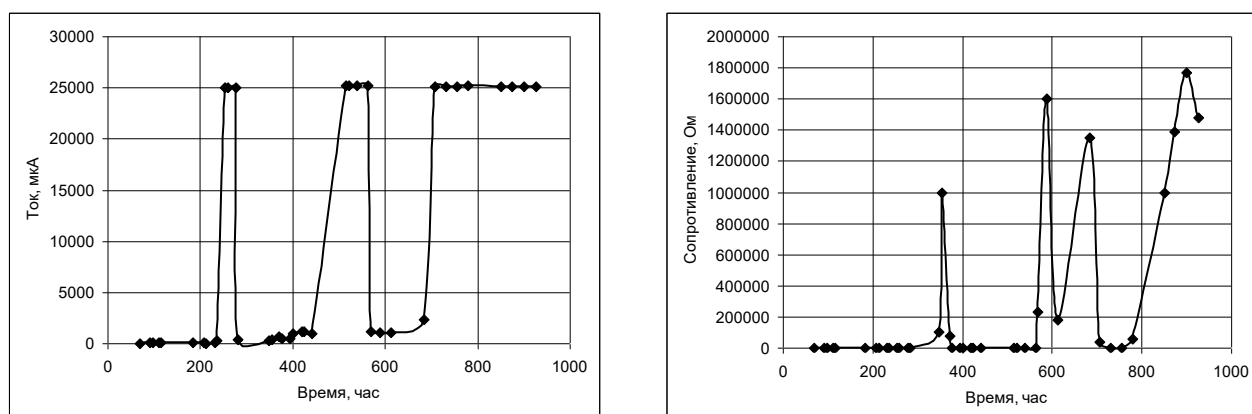


Рис. 8. Резкое увеличение и спад до прежних значений измеряемого тока и сопротивления для датчика 3-1

Резкий скачок измеряемого тока до одной и той же максимальной величины 25000 мкА у различных образцов может свидетельствовать о разрыве проволоки датчика R_x , при котором ток в измерительную диагональ поступает через другие участки цепи, сопротивления в которых являются постоянными. Однако при разрыве сопротивление R_x должно стать бесконечным, в то же время оно не является бесконечным. Еще более примечательным является неоднократный возврат тока в измерительной диагонали и сопротивления датчика R_x к прежним небольшим величинам.

Это может быть обусловлено тем, что образующийся разрыв между концами проволоки заполняет вода, имеющая проводимость и намного большее, чем константовая проволока, сопротивление. Восстановление малых значений

сопротивления и тока в измерительной диагонали может быть обусловлено лишь сращиванием концов проволоки. Это, в свою очередь, обусловлено гальваническим процессом растворения медной составляющей проволоки в очень тонком зазоре между ее оборванными концами. При этом ионы меди на положительно заряженном конце проволоки отрываются с ее поверхности под влиянием огромной напряженности электрополя (из-за очень малой толщины зазора) и оседают на конце с отрицательным потенциалом, закорачивая вновь проволоку.

Проверим это предположение соответствующими расчетами.

При обрыве датчика ток в измерительной диагонали проходит через сопротивления R_1 , R_{BH} и R_3 по схеме на рис. 9.

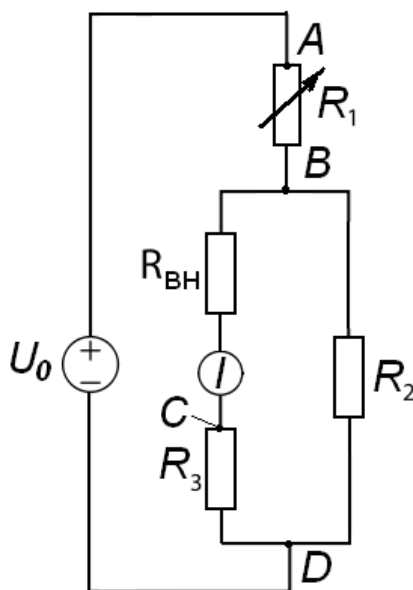


Рис. 9. Схема мостовая измерительная при обрыве проволоки в датчике R_x

В соответствии с этой схемой измерительным становится участок BCD, включенный в контур, состоящий из двух параллельных сопротивлений – сопротивление участка BCD $R_{BCD} = R_{BH} + R_3$ (с индикатором между ними) и

сопротивление R_2 . Общее сопротивление этого контура R_{BCDB} равно

$$R_{BCDB} = \frac{(R_{BH} + R_3) \cdot R_2}{R_{BH} + R_3 + R_2} \quad (7)$$

Общий ток, протекающий по всей цепи,

$$I_0 = \frac{U_0}{R_1 + R_{BCD} + R_2} \quad (8)$$

На измерительный контур поступает напряжение U_{BD}

$$U_{BD} = U_0 - I_0 R_1 \quad (9)$$

Соответственно, ток, протекающий по участку BCD,

$$I_{BCD} = \frac{U_0 - I_0 R_1}{R_{BCDB}} \cdot \frac{R_2}{R_{BH} + R_3 + R_2} \quad (10)$$

Определим отдельные составляющие этого уравнения

$$R_{BCDB} = \frac{(12,8 + 55) \cdot 55 \left(\frac{Om \cdot Om}{Om} \right)}{12,8 + 55 + 55} = \frac{67,8 \cdot 55}{122,8} = 30,36(Om),$$

$$U_{ИЗМ} = U_0 \cdot \left(\frac{R_x}{R_3 + R_x} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right),$$

$$I_0 = \frac{4,8}{55 + 30,36} \left(\frac{B}{Om} \right) = \frac{4,8}{85,36} = 0,0562(A).$$

Подставляя эти величины в (10), получим

$$I_{BCD} = 0,0562 \cdot \frac{55}{12,8 + 55 + 55} = 0,0562 \cdot \frac{55}{122,8} = 0,025(A) = 2500(\mu A).$$

Эта величина в точности соответствует показываемой мультиметром.

Конечная величина сопротивления датчика R_x (1-1,6 МОм), а не бесконечная, обусловлена, как отмечалось, заполнением

зазора водой. Удельная электропроводность питьевой воды, по [5], равна 100÷1300 мСм/см. Преобразуем эти величины

$$\lambda = 100 \cdot 10^{-6} \left(\frac{1}{Om \cdot m} \right) \frac{1}{Om \cdot m} = 10^{-4} \left(\frac{1}{Om \cdot m} \right),$$

$$\lambda = 1300 \cdot 10^{-6} \left(\frac{1}{Om \cdot m} \right) \frac{1}{Om \cdot m} = 1,3 \cdot 10^{-3} \left(\frac{1}{Om \cdot m} \right).$$

Удельное сопротивление воды

$$\rho = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{10^{-4}} \left(\frac{1}{\frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}} \right) = 10^4 (\text{Ом} \cdot \text{м}),$$

$$\rho = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{1,3 \cdot 10^{-3}} \left(\frac{1}{\frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}} \right) = 7,7 \cdot 10^2 (\text{Ом} \cdot \text{м}).$$

Длина разрыва определяется растяжимостью бетона. Примем ее, по [6], равной $(1-1,5) \cdot 10^{-4}$.

При длине стороны куба 10 см = 0,1 м длина зазора составит $(1-1,5) \cdot 10^{-5}$ м.

Определим сопротивление воды в зазоре между концами оборванной проволоки по формуле

$$R_3 = \rho \cdot \frac{l}{S} \left(\text{Ом} \cdot \text{м} \cdot \frac{\text{м}}{\text{м}^2} = \text{Ом} \right). \quad (11)$$

При диаметре проволоки датчика $d = 0,15 \text{ мм} = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ площадь ее сечения S равна

$$S = \pi \cdot \frac{d^2}{4}, \quad (12)$$

или численно

$$S = 3,14 \cdot \frac{1,5^2 \cdot 10^{-8}}{4} = 1,77 \cdot 10^{-8} (\text{м}^2).$$

С учетом величин l и S сопротивление воды в зазоре по (11) равно

$$R_3 = 10^4 \cdot \frac{1 \cdot 10^{-5}}{1,77 \cdot 10^{-8}} = 5,7 \cdot 10^6 (\text{Ом}) = 5,7 (\text{МОм}),$$

$$R_3 = 7,7 \cdot 10^2 \cdot \frac{1 \cdot 10^{-5}}{1,77 \cdot 10^{-8}} = 4,35 \cdot 10^5 (\text{Ом}) = 0,44 (\text{МОм}),$$

а при длине зазора $1,5 \cdot 10^{-4}$ м

$$R_3 = 7,7 \cdot 10^2 \cdot \frac{1,5 \cdot 10^{-5}}{1,77 \cdot 10^{-8}} = 6,52 \cdot 10^5 (\text{Ом}) = 0,65 (\text{МОм}).$$

Как видим, измеренные величины сопротивления (1-1,6) МОм находятся в интервале этих граничных значений (0,65-5,7 МОм).

Следует также отметить, что в контрольном образце №4, который не подвергался воздействию электрического

напряжения, резкое возрастание тока и сопротивления не происходило даже за еще больший период времени (2629 часов по сравнению с 1975 часов и намного менее для датчика 3-1). Это свидетельствует о том, что резкое увеличение тока и сопротивления действительно обусловлено

разрывом проволоки датчика, которое обусловлено деформацией растяжения бетонного образца под влиянием пульсирующего постоянного напряжения.

Вместе с тем в ряде мест над проволокой тензодатчиков через некоторое время обработки образца напряжением появляются ярко-голубые пятна, как, например, на рис. 10. Это может быть обусловлено образованием гидроксида меди $\text{Cu}(\text{OH})_2$, характеризующегося ярко-голубым цветом. Возникновение гидроксида меди за счет коррозии константана исключается, т.к. константан является коррозионно-стойким сплавом [7]. Следовательно, образование $\text{Cu}(\text{OH})_2$ обусловлено разрывом проволоки с образованием очень тонкого зазора, в пределах которого между концами разорвавшейся проволоки возникла высокая напряженность электрополя. Это

привело к возникновению гальванической меди, при котором катионы меди отрываются от анода, перемещаются к катоду и, восстанавливаясь, превращаются в атомы и чистую медь. Часть катионов меди выходит диффузионно в воду из зазора и трещины. Постепенно вода в этих трещинах становится щелочной (за счет жидкой фазы бетона), что приводит к образованию $\text{Cu}(\text{OH})_2$ ярко-голубого цвета.

Медь, которая нарастает на катоде, постепенно приводит к зарастанию зазора (достаточно даже частичного), что приводит к восстановлению прежнего сопротивления и тока в измерительной цепи.

Разрыв проволоки в датчике 3-1 вверху образца подтверждается увеличением ширины куба поверху, рис. 11, 12.

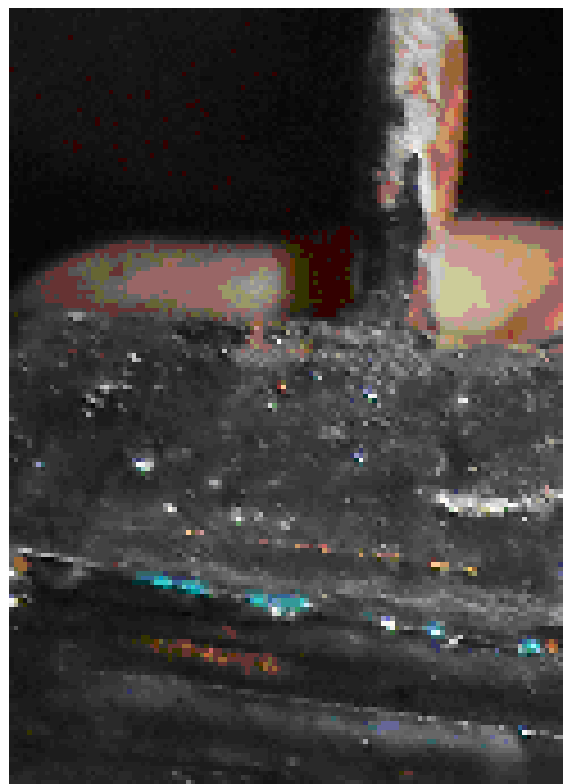


Рис. 10. Фото образца-куба №3 после обработки напряжением в течение 46 сут (слева) и увеличенный фрагмент с голубыми пятнами над проволочным верхним датчиком из константана (справа)

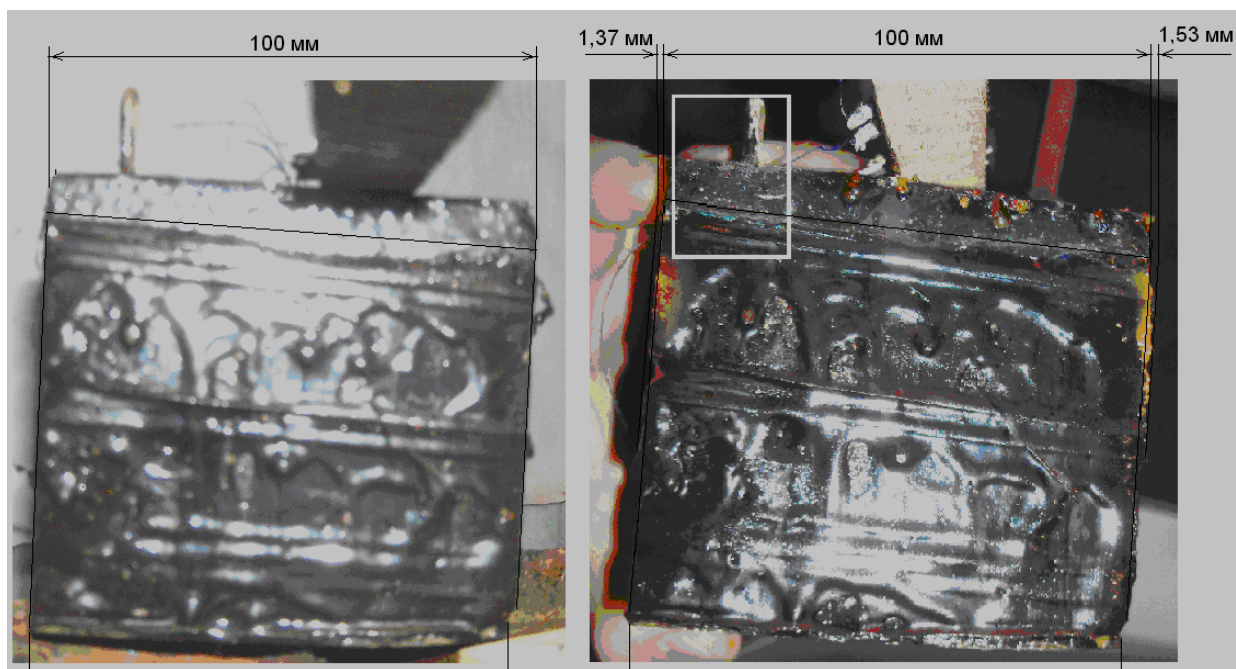


Рис. 11. Сопоставительные размеры образца-куба № 3 до обработки напряжением (слева) и после (справа)

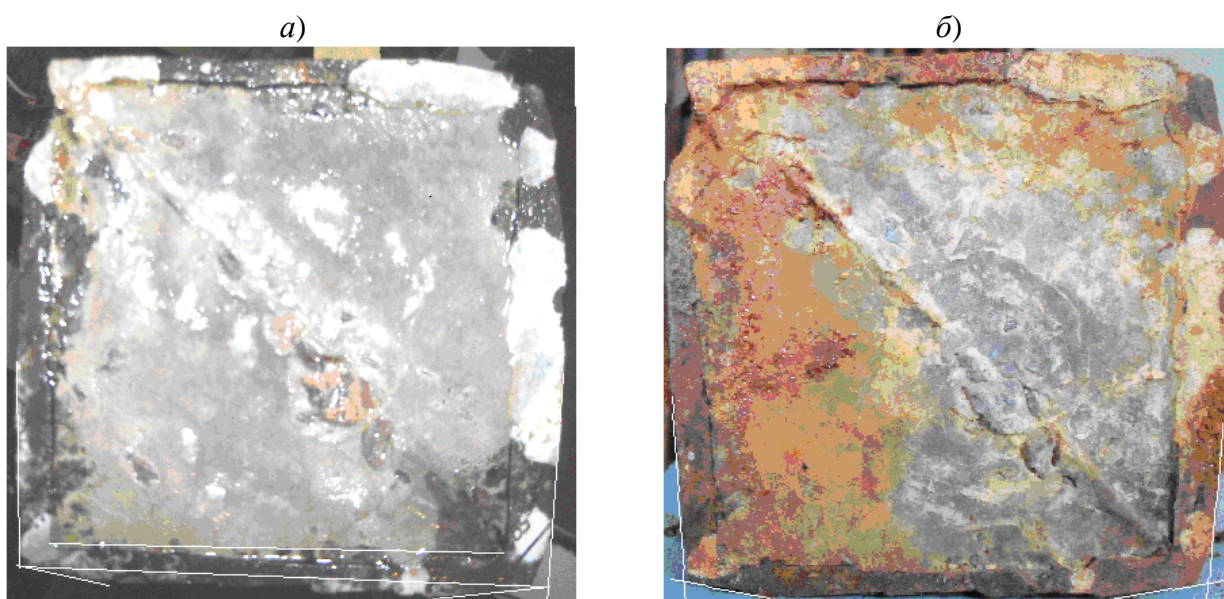


Рис. 12. Фото образца-куба № 3 снизу до обработки напряжением (а) и после обработки (б) в течение 82 сут (31.01.13)

Подобные ярко-голубые пятна возникли и над проволокой датчика 6-1 образца № 6, рис. 13. Из оптико-микроскопического снимка, рис. 14, а, и увеличенного фрагмента, рис. 14, б, видно,

что голубое пятно возникло на месте трещины в частице эпоксидной смолы ЭД и ЗС-3 и распространилось в прилегающей к ней зоне.

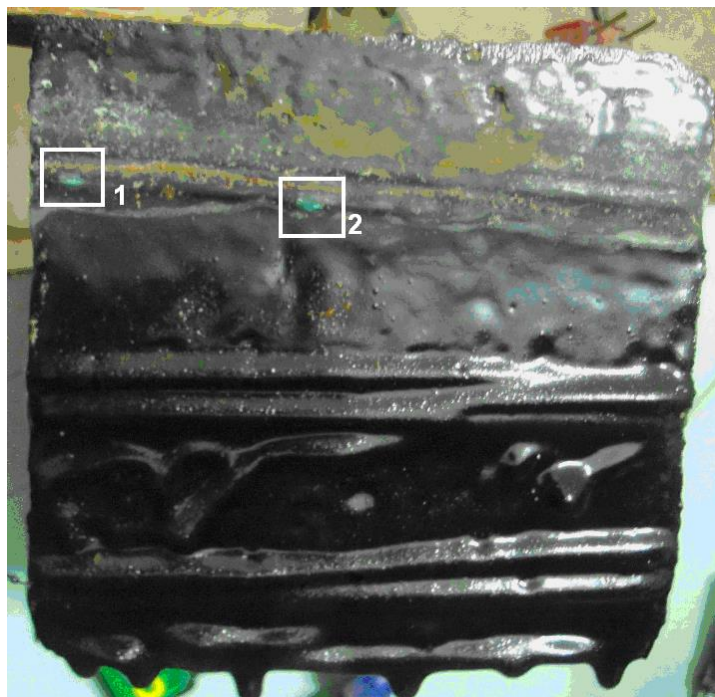


Рис. 13. Фото боковой грани образца-куба № 6 после обработки напряжением в течение 44 сут с выделенными окнами 1 и 2 с голубыми пятнами над константановой проволокой

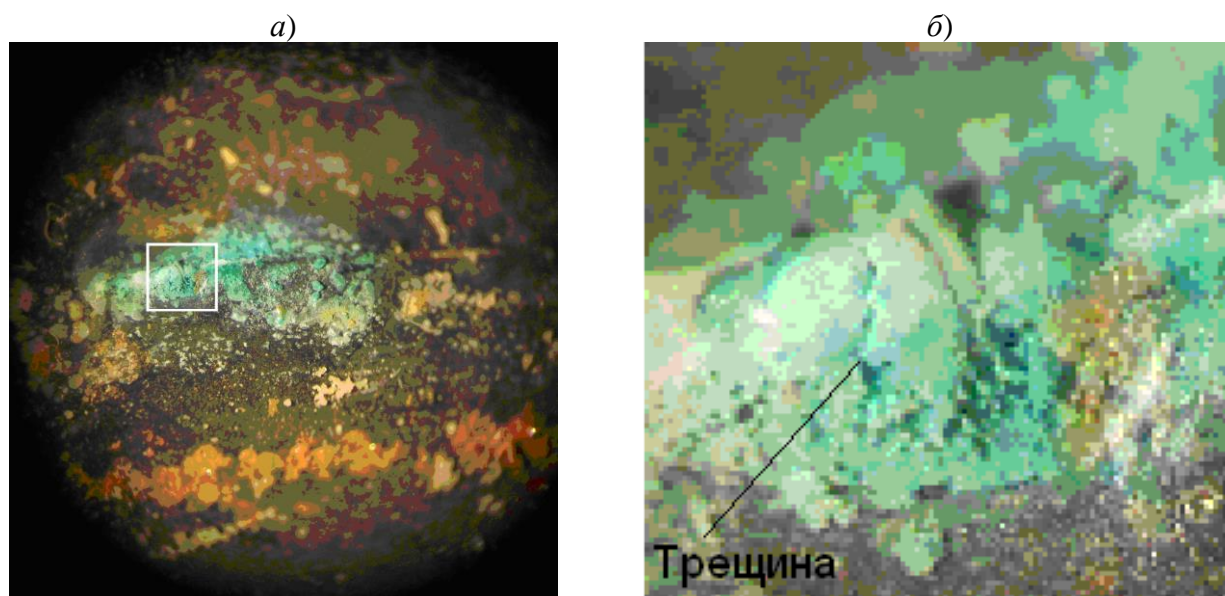


Рис. 14. МС из окна 1 (а), $\times 12$, и увеличенный ($\times 130$) фрагмент из него с трещиной в частице эпоксидной смолы ЭД и ЗС-3

Прямым подтверждением возникновения трещин в бетоне от воздействия пульсирующего постоянного напряжения является возникновение трещин в бетоне

внизу бетонной призмы 10x10x40 см при длительном (23 мес) воздействии на нее указанного напряжения, рис. 15, 16, четко видимые на МС, рис. 17, 18.

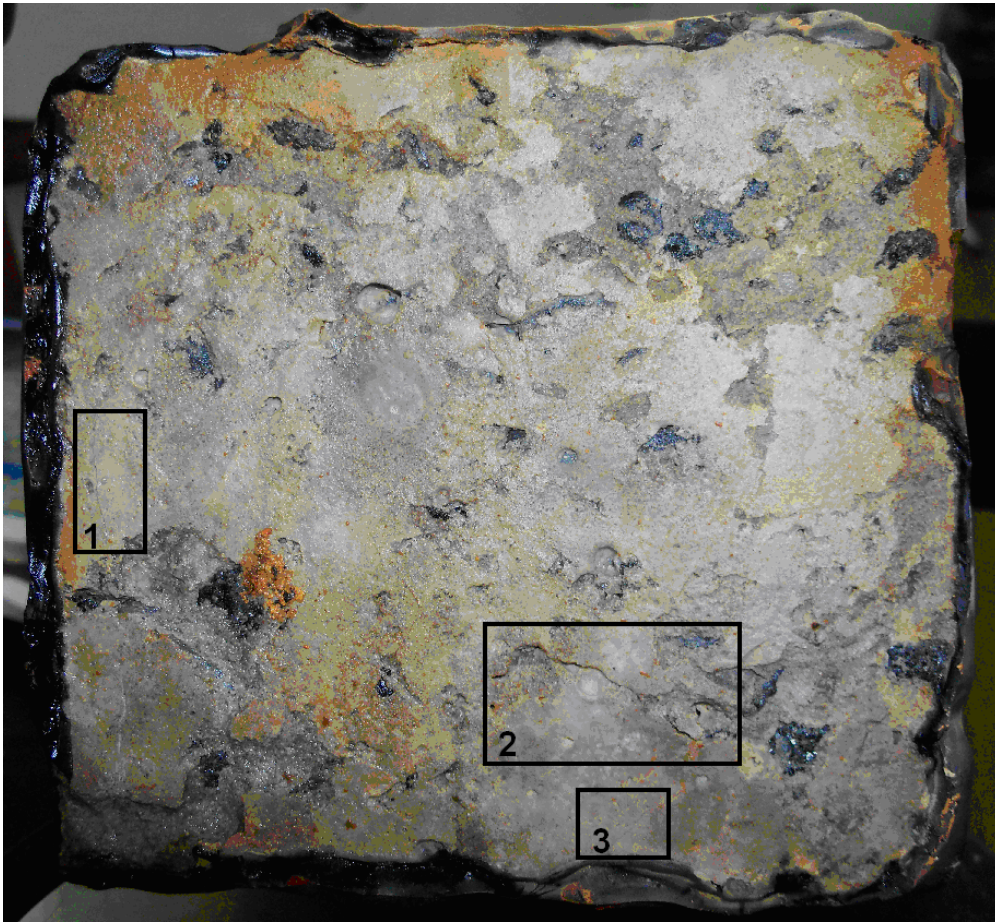


Рис. 15. Трещины в бетоне снизу призмы (10x10x40 см) после 700 сут обработки пульсирующим постоянным напряжением 30 В

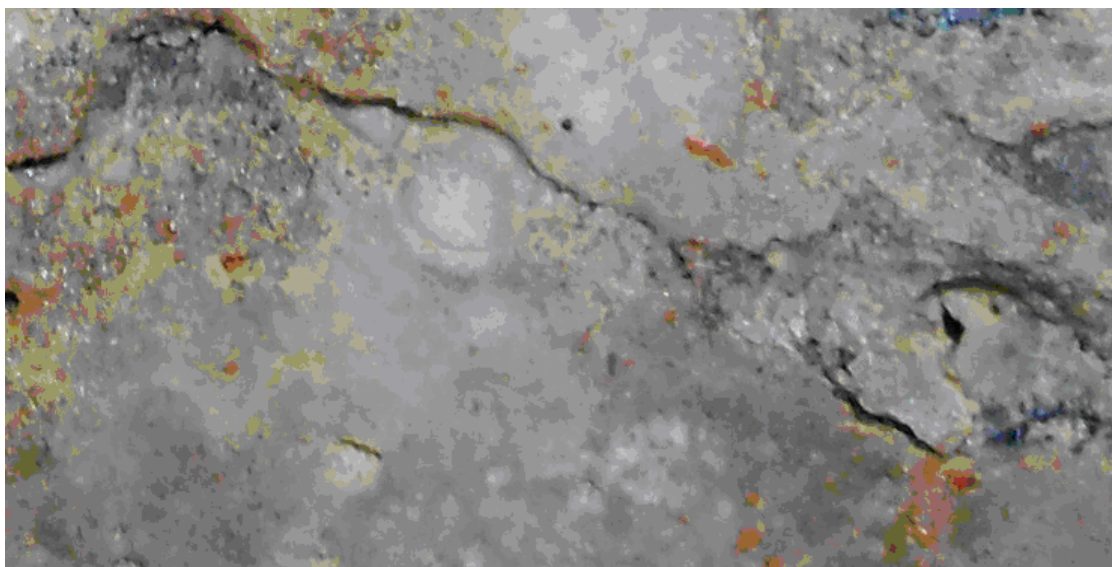


Рис. 16. Увеличенный фрагмент 2 с трещиной из фото на рис. 15 (29.03.2013)

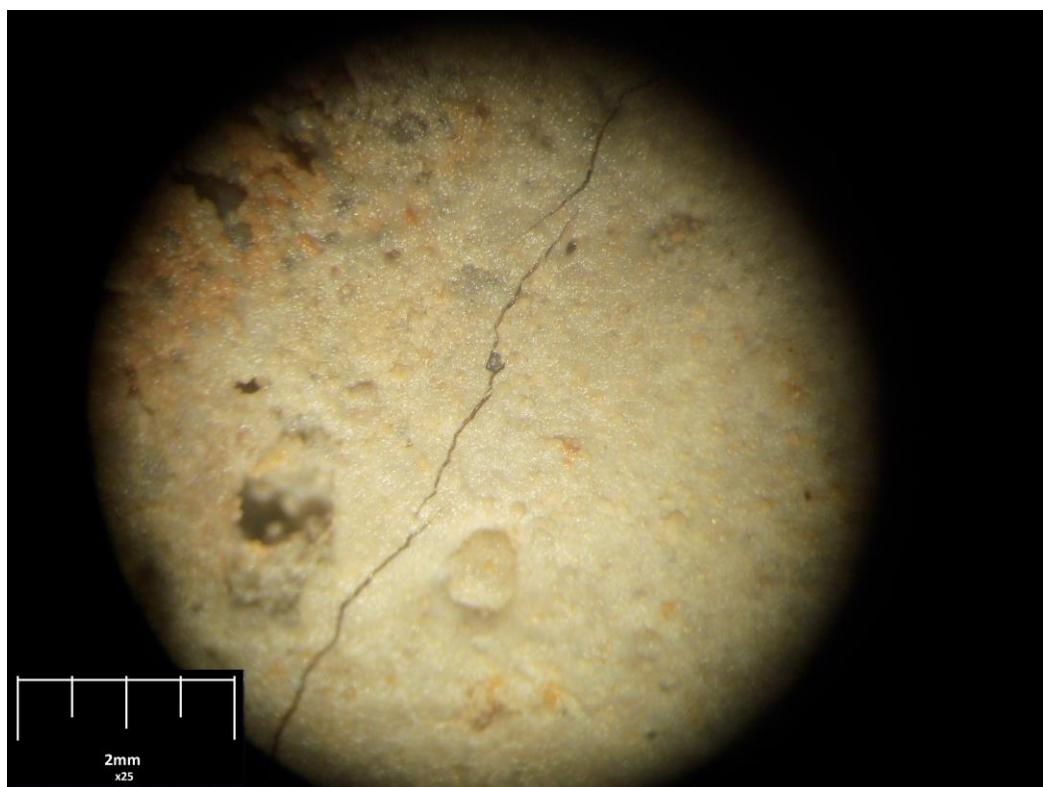


Рис. 17. МС из фрагмента 1 с трещиной из рис. 15 (29.03.2013) $\times 50$



Рис. 18. МС из фрагмента 3 с трещиной из рис. 15 (29.03.2013) $\times 25$

Описанный характер изменения тока, а следовательно, растягивающих напряжений, деформаций и трещин в бетоне свидетельствует о следующем. Сразу с наложением пульсирующего постоянного напряжения в капиллярах бетонного образца начинается преобладающий электромиграционный перенос катионов кальция Ca^{2+} из ДЭС частиц гидросиликатного геля и капилляров бетона в целом. Вынесенные катионы подхватываются потоком воды, так что тормозящего мембранного потенциала не возникает, и поток катионов не прекращается. Соответственно, понижается концентрация катионов Ca^{2+} в растворе, в бетоне возникает избыточный отрицательный заряд, растут растягивающие деформации образца и проволочных датчиков, а следовательно, измеряемый ток.

Скачкообразное изменение тока свидетельствует о протекании процессов растворения, сменяющихся кристаллизацией портландита, при которых концентрация катионов кальция увеличивается и уменьшается, соответственно, увеличивая и уменьшая этим ток.

Вместе с тем в верхней части образца портландит преобразуется в кальцит, видимый невооруженным глазом (рис. 19), уже через несколько дней воздействия напряжения. У кальцита величина равновесного электроповерхностного потенциала равна 0,2 В, что значительно меньше, чем у портландита (0,54 В). Это, а также возникновение избыточного отрицательного заряда приводит к снижению прочности и возникновению растягивающих напряжений, и в бетоне возникает микротрещина, приводящая к разрыву проволоки датчика вверху образца, например, рис. 14.



Рис. 19. Образование кальцита на поверхности бетонного образца через некоторое время после начала воздействия образца напряжением

По мере увеличения времени воздействия напряжения избыточный заряд

накапливается в средней зоне образца, туда же проникает углекислый газ, образуется

кальцит, что приводит к разрыву проволоки датчика.

Длительное сохранение неповрежденным проволочного датчика в нижней зоне образца обусловлено длительностью процесса электромиграционного перемещения Ca^{2+} из верхней и средней зон образца и компенсацией выщелачивания бетона растворением портландита.

Выводы. Таким образом, выполненные экспериментально-теоретические исследования подтверждают реальность возникновения растягивающих напряжений, деформаций и трещин в обводненном бетоне под действием пульсирующего постоянного напряжения и тока.

Список литературы

1. Плугин, А.Н. Электрокоррозия железобетонных мостов и других искусственных сооружений [Текст] / А.Н. Плугин, А.А. Скорик, А.А. Плугин и др. // Залізничний транспорт України. – 2004. – № 1. – С. 11-13.
2. Плугин, А.Н. Электроосмотический перенос как фактор разрушения железобетонных и каменных опор железнодорожных мостов на водотоках [Текст] / А.Н. Плугин, А.А. Плугин, С.В. Мирошниченко и др. // Зб. наук. праць ЛНАУ. Серія «Технічні науки». – Луганськ: ЛНАУ, 2007. – №71 (94). – С. 189-196.
3. Схема измерительного моста. – Википедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: ru.wikipedia.org/wiki/Измерительный_мост.
4. Исследование влияния переменного электрического поля в бетоне на его электрокоррозию [Текст] / А.Н. Плугин, А.А. Плугин, А.А. Дудин, Ал.А. Плугин, О.С. Борзяк, А.А. Конев // Вісник ОДАБА. – Одеса, 2010. – Вип. 43. – С. 517-524.
5. Кондуктометры карманные – PitVoda Екатеринбург [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.pitvoda.ru/catalogue.php?sid=22.
6. Берг, О.Я. Высокопрочный бетон [Текст] / О.Я. Берг, Е.Н. Щербаков, Г.Н. Писанко. – М.: Госстройиздат, 1971. – 208 с.
7. Константан – сплав с неизменным удельным электросопротивлением... [Электронный ресурс]. – Режим доступа: ukrnichrom.com.ua/content/view/403/45/lang,ru.

Ключевые слова: электрифицированная железная дорога, электрические потенциалы, бетон, внутренние напряжения, трещины.

Аннотации

Розглянуті експериментально-теоретичні дослідження, які підтверджують реальність виникнення розтягуючих напружень і деформацій в обводненому бетоні і виникнення мікротріщин в ньому під дією пульсуючої однонаправленої напруги і струму. В лабораторних дослідженнях застосовувались константановий дріт як датчик, здатний фіксувати напруження, та мостова вимірювальна схема для реєстрації цих напружень. Відмічено, що електроміграційний перенос катіонів кальцію Ca^{2+} з ПЕШ частинок гідросилікатного гелю та капілярів бетону понижає концентрацію катіонів Ca^{2+} в розчині, внаслідок чого в бетоні виникає надлишковий негативний заряд, ростуть розтягуючі деформації зразка і дротяних датчиків, і відповідно, вимірювальний струм. Дія вказаного напруження буде приводити до вилугування бетону на контакті з водою і його електрокорозійного руйнування.

Рассмотрены экспериментально-теоретические исследования, подтверждающие реальность возникновения растягивающих напряжений и деформаций в обводненном бетоне и возникновение микротрещин в нем под действием пульсирующего однонаправленного напряжения и тока. В лабораторных исследованиях применялись константановая проволока как датчик, способный фиксировать напряжения, и мостовая измерительная схема для регистрации этих напряжений. Отмечено, что электромиграционный перенос катионов кальция Ca^{2+} из ДЭС частиц гидросиликатного геля и капилляров бетона понижает концентрацию катионов Ca^{2+} в растворе, вследствие чего в бетоне возникает избыточный отрицательный заряд, растут растягивающие деформации образца и проволочных датчиков, а следовательно, измеряемый ток. Воздействие указанного напряжения будет приводить к выщелачиванию бетона на контакте с водой и его электрокоррозионному разрушению.

The experimental and theoretical studies that confirm the reality of the tensile stress and strain in the concrete and watered appearance of microcracks in it under the influence of a pulsating unidirectional voltage and current. In laboratory studies used constantan wire, the sensor is capable of clamping voltage and bridge measuring circuit, for the registration of these stresses. Noted that electromigratory transfer of calcium cations Ca^{2+} electric double layer (EDL) particles of gel and capillary hydrosilicate concrete lowers the concentration of Ca^{2+} cations in solution, resulting in concrete occurs excess negative charge, grow tensile deformation of the specimen and wire gauges, and, therefore, the measured current. The impact of this tension will lead to leaching of concrete on contact with water and elektrokorroziionnomu destruction.

УДК 691.32

Канд. техн. наук А.В. Афанасьев

A. V. Afanasyev

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА СМАЧИВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ ПО КРАЕВОМУ УГЛУ СМАЧИВАНИЯ

STUDY OF THE MECHANISM OF STEEL WETTING THE EDGES OF THE CONTACT ANGLE

Представил д-р техн. наук, профессор А.А. Плугин

Постановка проблемы. Лакокрасочные покрытия, используемые для защиты от коррозии металлических конструкций должны обладать рядом свойств, обеспечивающих долговечность. На срок службы покрытия могут влиять многие факторы, в том числе способ его нанесения и смачивание поверхности. Для исследования смачивания лакокрасочным составом металлической поверхности

можно использовать методику измерения краевого угла смачивания [1; 2].

Цель – исследование механизма смачивания поверхности стали полимеркомпозиционными защитными покрытиями.

Анализ существующих решений. Традиционно [2, 3] смачивание твердой поверхности жидкостями базируется на рассмотрении схемы равновесия жидкой

капли на твердой поверхности под действием поверхностных натяжений на границах раздела трех фаз – твердая – жидкая и газообразная (рис.1).

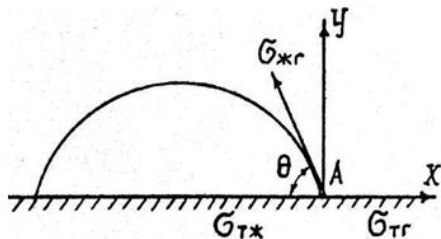


Рис. 1. Схема действия сил в системе капля жидкости – твердая поверхность, по существующим представлениям

В этой традиционно рассматриваемой схеме в жидкости отсутствуют другие вещества, способные к адсорбции на поверхности раздела. На схеме изображены следующие силовые компоненты поверхностного натяжения на границе раздела: σ_{TG} – твердое тело – газ; σ_{TJ} – твердое тело – жидкость и σ_{JG} – жидкость – газ. Угол θ – краевой угол смачивания. Поверхностные натяжения приложены к периметру смачивания, являющемуся

границей раздела трех фаз, нормально к периметру и касательно к двухфазным поверхностям раздела.

Способность жидкости смачивать твердое тело определяется величиной краевого угла. При полном смачивании капля растекается по поверхности в мономолекулярную пленку. При несмачивании капля остается на поверхности в виде шара. При неполном смачивании капля частично растекается по поверхности и образует с ней некоторый угол (рис. 1). Исходя из этого, для эпоксидно-каменноугольного покрытия наблюдается неполное смачивание. Капля жидкости может растекаться по поверхности, если она хорошо смачивается, а если поверхность плохо смачивается, то капля растекаться не будет.

Традиционная схема смачивания на основе капли и поверхностных натяжений на границе трех фаз твердая – жидкая и газообразная применительно к смачиванию, например, эпоксидно-каменноугольным составом поверхности стали изменяется. Ее следует рассматривать по аналогии со схемой, данной в [4] для трех фаз сталь – вода – масло (рис.2).



Рис. 2. Форма капли, обусловленная поверхностными натяжениями на различных границах соприкасающихся фаз

Краевой угол θ измеряется в сторону более полярной фазы (в данном случае в сторону воды). Уравнение равновесия принципиально не изменяется, изменяются лишь поверхностные натяжения, не для

газа, а для масла, соответственно, уравнение Юнга

$$\sigma_{2,3} = \sigma_{1,3} + \sigma_{1,2} \cos \theta, \quad (1)$$

откуда получим выражение для краевого угла смачивания θ :

$$\cos\theta = \frac{\sigma_{2,3} - \sigma_{1,3}}{\sigma_{1,2}}. \quad (2)$$

Поверхностные явления описываются также работой адгезии, которая оценивается уравнением Дюпре

$$W_a = \sigma_{1,2} + \sigma_{2,3} + \sigma_{1,3}. \quad (3)$$

Используя соотношения (1; 3), получим уравнение Дюпре – Юнга

$$W_a = \sigma_{1,2}(1 + \cos\theta). \quad (4)$$

Работа когезии W_k характеризует энергетические изменения поверхностей раздела при взаимодействии частиц одной фазы.

По (4) на отрыв жидкости от поверхности твёрдого тела при полном смачивании (когда $\cos\theta = 0$) затрачивается работа, необходимая для образования двух жидких поверхностей – $2\sigma_{жг}$, т.е. $W_k = 2\sigma_{жг}$, где $2\sigma_{жг}$ – поверхностное натяжение жидкости на границе с газом.

Это значит, что при полном смачивании жидкость не отрывается от поверхности твёрдого тела, а происходит разрыв самой жидкости, т.е. при полном

смачивании $\sigma_{1,2} \leq \sigma_{1,3}$. Подставив в уравнение Юнга значения работ адгезии и когезии, получим

$$\cos\theta = \frac{2W_a - W_k}{W_k}. \quad (5)$$

Из этого уравнения следует, что смачиваемость жидкостью твёрдого тела тем лучше, чем меньше работа когезии (и поверхностное натяжение жидкости на границе с газом). Для характеристики смачивающих свойств жидкости используют также относительную работу адгезии $z = W_a / W_k$. Однако количественная оценка смачивающей способности эпоксидно-каменноугольным составом стали по этому уравнению не представляется возможной, т.к. в жидкой фазе находятся другие вещества, способные к адсорбции на поверхности раздела, а также из-за отсутствия всех величин поверхностного натяжения.

Анализ растекания капли защитного состава на металлической поверхности. Намного более информативной и дающей возможность оценки смачивания стальной поверхности эпоксидно-каменноугольным составом является схема действия сил в системе «капля жидкости – твердая поверхность» (рис. 3) и соответствующие уравнения, разработанные А.Н.Плугиным в [5].

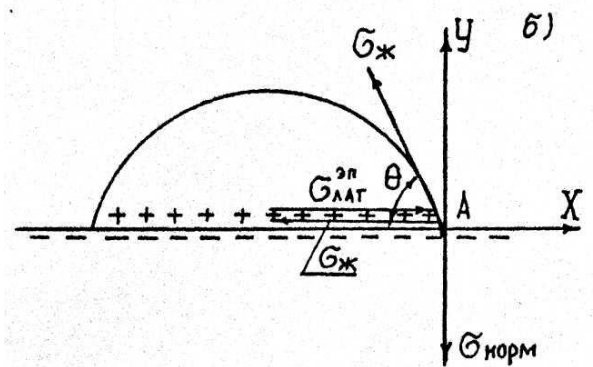


Рис. 3. Схема действия сил в системе «капля жидкости – твердая поверхность» по рассматриваемому механизму

В соответствии с этой схемой все составляющие поверхностной энергии выражены с помощью векторов сил: $\sigma_{ж}$ – направлен вдоль поверхностей раздела жидкости с твердой и газообразной фазами, $\sigma_{ЛАТ}$ и $\sigma_{НОР}$, соответственно, параллельно и нормально к поверхности твердой фазы.

Силовая характеристика адгезии $\sigma_{НОР}$, поверхностное натяжение жидкости $\sigma_{ж}$ и латеральные силы отталкивания $\sigma_{ЛАТ}$ учитывают все виды взаимодействий молекул жидкости и противоионов в граничном слое и с твердой поверхностью. Уравнение для равновесного краевого угла смачивания имеет вид [5]

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{\sigma_{НОР}^{\text{ЭЛ}} + \sigma_{НОР}^{\text{МОЛ}}}{\sigma_{ЛАТ}^{\text{ЭЛ}} - \sigma_{жГ} + \sigma_{НОР}^{\text{МОЛ}}} \quad (6)$$

Величины $\sigma_{ЛАТ}^{\text{МОЛ}}$ и $\sigma_{НОР}^{\text{МОЛ}}$ можно определить с помощью абсолютного $\Psi^0_{ЭП}$ и равновесного $\Psi^p_{ЭП}$ электроповерхностных потенциалов по методике [5; 6].

Согласно [6]

$$\sigma_{ЛАТ}^{\text{ЭЛ}} = \frac{12,1 \cdot z_0 \sqrt{z_0 \Psi^0_{ЭП}}}{\delta_x^2 \sqrt{\delta_x}} \quad (7)$$

Электрическая составляющая силовой характеристики адгезии $f_{НОР}^{\text{ЭЛ}}$ для заряженной поверхности полярной жидкости равна

$$f_{НОР}^{\text{ЭЛ}} = \frac{\Psi_1 \mu}{\delta_1^2}, \quad (8)$$

где δ_l – расстояние от поверхности (центра поверхностного атома) до центра дипольного момента адсорбированной молекулы жидкости; μ – дипольный момент молекулы жидкости; Ψ_1 –

потенциал в центре дипольного момента молекулы жидкости.

Удельная нормальная составляющая электростатической силы, притягивающей контур к поверхности, равна

$$\sigma_{НОР}^{\text{ЭЛ}} = \frac{f_{НОР}^{\text{ЭЛ}}}{d} = \frac{\Psi^0 \mu}{\delta_1^2 d} \quad (9)$$

Определим величину краевого угла смачивания на поверхности стали тонкого (конденсатного) слоя воды. Равновесный электроповерхностный потенциал стали равен $E_{СТ} = +1,36$ В, оксидной пленки $Fe_2O_3 - (-0,156)$ [7].

Поверхностное натяжение воды $\sigma_{ж} = 0,072$ Н/м. Дипольный момент воды $\mu = 6,1 \times 10^{-30}$ Кл·м [8]. Диаметр молекулы воды $d = 2,8$ Å.

Рассчитаем величины $\sigma_{ЛАТ}^{\text{ЭЛ}}$ и $\sigma_{НОР}^{\text{ЭЛ}}$ и θ для капли воды на поверхности стали по методике, изложенной в [5]. Радиус атома стали $r_{Fe} = 1,26$ Å; $r_{H_3O^+} = 1,35$ Å [8].

Поверхность стали обычно покрыта кислородной пленкой. Высокая электроотрицательность атомов кислорода обуславливает смещение центра отрицательного электроповерхностного заряда стали атомов железа на поверхностные атомы кислорода. Во влажных условиях происходит протонирование кислорода с превращением ионов O^{2-} в OH^- . Поэтому для стали расстояния δ_x и δ_l необходимо определять, исходя из радиуса иона OH^- , а не радиуса атома Fe , и радиуса противоиона, которым являются одновалентные катионы обычной водопроводной воды $r_{Na^+(Ca^{2+})} = 1,0$ Å.

$$\delta_l = r_{OH^-} + \delta_{Na^+} = 1,53 + 1,0 = 2,53 \text{ Å};$$

$$\delta_k = r_{OH^-} + d_{H_2O} + r_{Na^+} = 1,53 + 2,8 + 1,0 = 5,33 \text{ Å}.$$

Силловые характеристики и θ

$$\sigma_{НОР}^{ЭП} = \frac{0,844 \cdot |0,156|}{2,53^2} = \frac{0,131}{6,4} = 0,0205, \text{ Н/м};$$

$$\text{tg}\theta = \frac{0,0205}{0,103 - 0,072} = \frac{0,0205}{0,031} = 0,66; \theta^{ЭП} = 33,5^\circ,$$

что соответствует данным предварительных измерений краевого угла смачивания воды на поверхности стали.

Выводы и рекомендации. Таким образом, используя выражения (7), (9), можно определить краевой угол смачивания для компонентов защитных покрытий.

Содержание в этих уравнениях электростатических составляющих $\sigma_{ЛАТ}^{ЭЛ}$ и

$\sigma_{НОР}^{ЭЛ}$ и незначительное влияние молекулярного вклада позволяют определить электроповерхностный потенциал твердых тел в жидкостях по величинам θ и $\sigma_{ЖГ}$.

Действие латеральных сил отталкивания необходимо учитывать при рассмотрении механизмов таких поверхностных явлений, как растекание, смачивание, капиллярное поднятие и др., а также различных гетерогенных процессов.

Список литературы

1. Руководство к практическим работам по коллоидной химии [Текст] / О.Н. Григоров, И.Ф. Карпова, З.П. Козьмина, Д.А. Фридрихсберг. – Л.: ЛГУ, 1955. – 212 с.
2. Фридрихсберг, Д.А. Курс коллоидной химии [Текст] / Д.А. Фридрихсберг: учеб. для вузов. – Л.: Химия, 1984. – 368 с.
3. Зимон, А.Д. Адгезия жидкости и смачивание [Текст] / А.Д. Зимон. – М.: Химия, 1974. – 413 с.
4. Физика пласта [Электронный ресурс]. – Режим доступа: books.za-um.info/load/0-0-0-75-20 -.
5. Плугин, А.Н. Электрогетерогенные взаимодействия при твердении цементных вяжущих [Текст]: дисс. ... д-ра хим. наук / А.Н. Плугин. – К.: ИКХХВ АН Украины, 1989. – 282 с.
6. Плугин, А.А. Долговечность бетона и железобетона в обводненных сооружениях: Коллоидно-химические основы [Текст]: дисс. ... д-ра техн. наук / А.А. Плугин. – Харьков: УкрГАЗТ, 2005. – 442 с.
7. Электроповерхностный потенциал простых веществ – основа моделирования прочностных и коррозионных свойств стальных и железобетонных конструкций [Текст] / А.Н. Плугин, А.А. Плугин, Ю.Н. Горбачева, А.В. Афанасьев // Науковий вісник ЛНАУ (3-тя наук. техн. конф. «Математичні моделі процесів в будівництві») (Залізобетонні конструкції та матеріали). – Луганськ, 24–25 березня 2010. – Луганськ: ЛНАУ, 2010. – Вип. 14. – С. 19-41.
8. Краткий справочник физико-химических величин [Текст]. – Л.: Химия, 1983. – 231 с.

Ключевые слова: стальная конструкция, поверхность, полимеркомпозиционный защитный состав, смачивание, краевой угол

Аннотации

Стаття присвячена дослідженню механізму змочування поверхні металу захисними покриттями за крайовим кутом змочування. Дана оцінка змочування металевої поверхні епоксидно-кам'яновугільним складом. Виведені рівняння дозволяють визначити крайовий кут змочування для компонентів захисних покриттів.

Статья посвящена исследованию механизма смачивания поверхности стали защитными покрытиями по краевому углу смачивания. Дана оценка смачивания стальной поверхности эпоксидно-каменноугольным составом. Выведенные уравнения позволяют определить краевой угол смачивания для компонентов защитных покрытий.

The article deals with the mechanism of wetting steel protective coatings from the boundary corner wetting. The estimation of the steel surface wetting epoxy-carboniferous structure. The derived equations allow us to determine the contact angle components of protective coatings.

УДК 691.3

*Д-р хим. наук А.Н. Плугин,
д-р техн. наук А.А. Плугин (УкрГАЗТ),
кандидаты техн. наук Ю.Г. Гасан,
Е.Н. Червенко (КНУСА)*

*A.N. Plugin, A.A. Plugin,
Yu.G. Gasan, E.N. Chervenko*

**СТРУКТУРА И ПРОЧНОСТЬ ГИПСОВОГО КАМНЯ:
РАЗВИТИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О СТРУКТУРЕ**

**STRUCTURE AND STRENGTH OF GYPSUM: DEVELOPMENT
OF IDEAS ABOUT THE STRUCTURE**

Постановка проблемы. Продукт гидратации полуводного гипса – двуводный гипс представляет собой высокодисперсную систему с водной дисперсионной средой. В связи с этим прочность и водостойкость определяются, в первую очередь, природой и водостойкостью контактов между его структурными элементами, а затем и самих структурных элементов. Природа указанных контактов остается недостаточно изученной.

Природа контактов между кристаллогидратными частицами двуводного гипса. Согласно существующим представ-

лениям, твердение полуводного гипса протекает по механизму, в соответствии с которым в пересыщенном растворе возникает большое количество зародышей $CaSO_4 \times 2H_2O$, которые растут до устойчивых кристаллов, образующих вначале контакты коагуляционного типа и, соответственно, коагуляционную структуру, являющуюся пластичной и малопрочной. Затем возникают фазовые кристаллизационные контакты (рис. 1) [1] и кристаллизационная структура, обеспечивающая прочность гипсового камня.

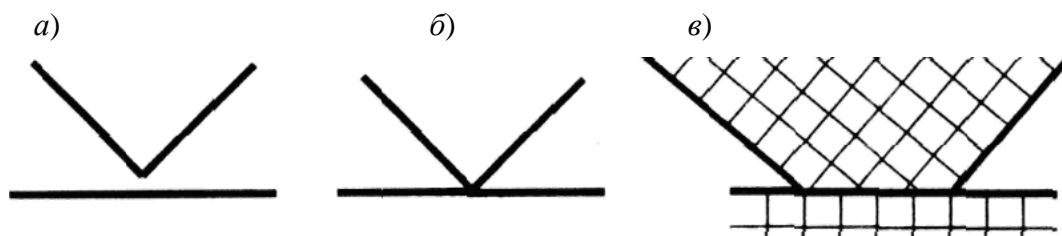


Рис. 1. Контакты между частицами: а, б – коагуляционные, в – фазовый

В фазових контактах сцепление частиц обусловлено близкодействующими силами когезии и переход из объема одной частицы в объем другой осуществляется непрерывно внутри одной фазы [1], т.е. возникают контакты срастания.

А.Ф. Полаком дано термодинамическое доказательство возможности контактообразования по такому механизму [2], при котором фазовые контакты срастания образуются за счет перемещения зародышей по поверхности кристалликов $CaSO_4 \times 2H_2O$ в зазор между ними. Достоверность такого механизма кристаллизационного срастивания кристалликов гипса, по мнению автора, основывается на понижении свободной энергии зародыша в зазоре, по сравнению с его положением на поверхности. При этом в качестве движущих факторов перемещения зародышей с поверхности частицы в зазор и образования зародышей контактов рассматривается диффузионное перемещение, а также флуктуация, по Фольмеру, и возникновение молекулярных связей между зародышами противоположных поверхностей в зазоре.

Однако такой механизм не учитывает образования ДЭС на поверхности кристалликов, а, следовательно, энергии ион-ионного притяжения между ПОИ и ПРИ, ион-дипольного притяжения молекул воды к ПОИ (энергия адсорбции молекул воды) и энергии ион-ионного отталкивания между ПРИ в ДЭС. Величины этих энергий намного превышают энергию теплового движения и молекулярного притяжения. Так, энергия теплового движения 1 моля вещества равна 2,435 кДж/моль, а энергия гидратации ПОИ, т.е. связывания воды на поверхности частиц, равна 1641 кДж/моль (для Ca^{2+}), а ион-ионного взаимодействия – еще больше. Об огромной энергии адсорбционного взаимодействия молекул воды с поверхностью свидетельствует и тот факт, что последние молекулы воды удаляются с поверхности твердого тела при температуре около 500–600°C.

Такое преобладание величин энергий ион-ионного и ион-дипольного взаимодействий над энергиями теплового движения и диффузионного перемещения, на наш взгляд, свидетельствует о малой вероятности образования фазовых контактов между кристаллическими частицами двуводного гипса.

Развиваемые нами представления о структуре, прочности и водостойкости гипса, контактах между ее структурными элементами (кристалликами двуводного гипса) основываются на фундаментальных положениях коллоидной химии и физико-химической механики дисперсных систем и материалов, развитых А.Н. Плугиным и А.А. Плугиным с соавт. применительно к вяжущим [3; 4], в том числе гипсу [5]. Основополагающими в них являются представления об электроповерхностных потенциалах простых и сложных веществ [6], латеральном электроповерхностном отталкивании между потенциалопределяющими ионами ПОИ и электроповерхностное давление, обусловленное энергией их гидратации. Согласно этим представлениям, полуводный и двуводный гипс обладают абсолютными $\psi_{ЭП}^0$ электроповерхностными потенциалами, соответственно, полуводный – 0,21 В, двуводрат – 0,1 В [5].

При контакте гипса с водой под влиянием абсолютного электроповерхностного потенциала происходит разделение зарядов. При этом образуется ДЭС, и частицы приобретают равновесные электроповерхностные потенциалы (при рН7, для собственной среды гипса). Для продольных граней блока $\psi_{ЭП}^P = \psi_{ЭП}^0 = 0,1В$, что обусловлено выходом на поверхность грани ДЭС пакетов и отсутствием в них свободной воды [5]. На торцевые грани ДЭС пакетов не выходят, и на них устанавливается равновесный электроповерхностный потенциал

$$\psi_{ЭП}^P = 0,1В - 0,059 \cdot pH = 0,1 - 0,059 \cdot 7 = -0,31В$$

Строение кристаллической решетки двуводного гипса. Двуводный гипс обладает явно выраженной слоистой структурой. Два листа, состоящие из анионных групп $[SO_4]^{2-}$ и тесно связанных с ними катионами Ca^{2+} , слагают двойные слои, между которыми расположены молекулы H_2O , что обуславливает совершенную спайность двуводного гипса

[7]. По [8] слои (пластинчатые пакеты) в структуре $CaSO_4 \times 2H_2O$ формируют цепи $SO_4^{2-}-Ca^{2+}-SO_4^{2-}$, в которых каждый из тетраэдров сульфат-ионов связан через кислородные атомы с двумя катионами Ca^{2+} (рис. 2). Эти пакеты держатся вместе водородными мостиковыми связями (рис. 3, 4) [8; 9].

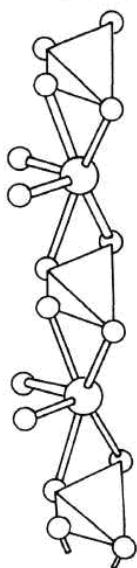


Рис. 2. Структура цепи $SO_4^{2-}-Ca^{2+}-SO_4^{2-}$

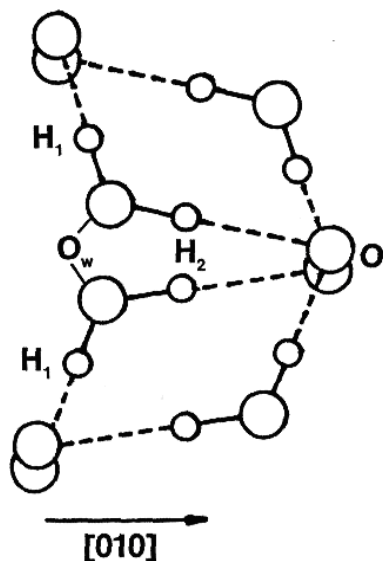


Рис. 3. Конфигурация водородных мостиковых связей в $CaSO_4 \times 2H_2O$ [8]

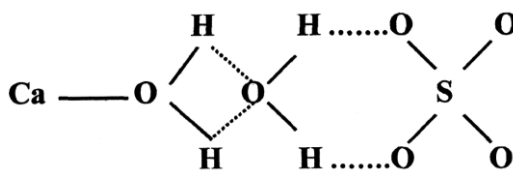


Рис. 4. Водородная связь в структуре двуводного гипса [9]

Согласно многочисленным электронно-микроскопическим снимкам ЭМС основными структурными элементами двуводного гипса являются крупные длинные кристаллические частицы призматической формы (рис. 5) длиной до 15 мкм, зачастую образующие параллельные сростки. Дополнительное

увеличение ЭМС (рис. 5) позволило выявить, что крупные призматические кристаллогидраты состоят из маленьких частиц, по форме близких к сферическим. Такие частицы обычно характерны для геля, например, гидросиликатного геля портландцемента.

Для уточнення цього на рис. 6 представлений один из характерных ЭМС гидросиликатов кальция с большим увеличением из [10], и на обоих ЭМС

(рис. 5, 6) выделены и увеличены фрагменты структуры (светлые рамки, рис. 7, 8) в сопоставимом масштабе.

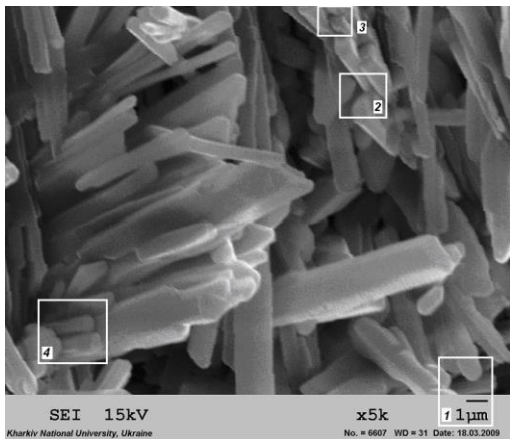


Рис. 5. ЭМС двуводного гипса [11]

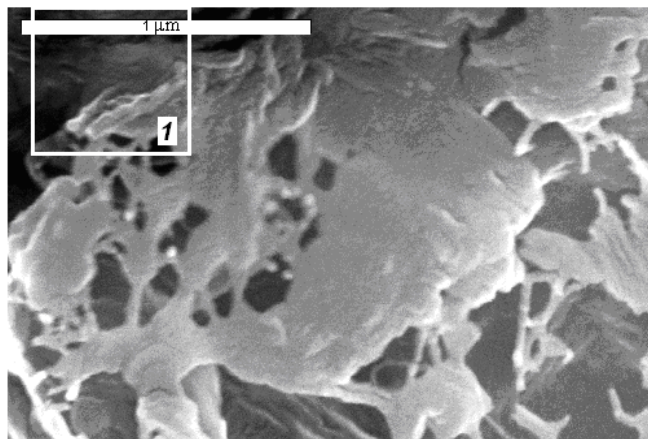


Рис. 6. ЭМС гидросиликатов кальция [10]

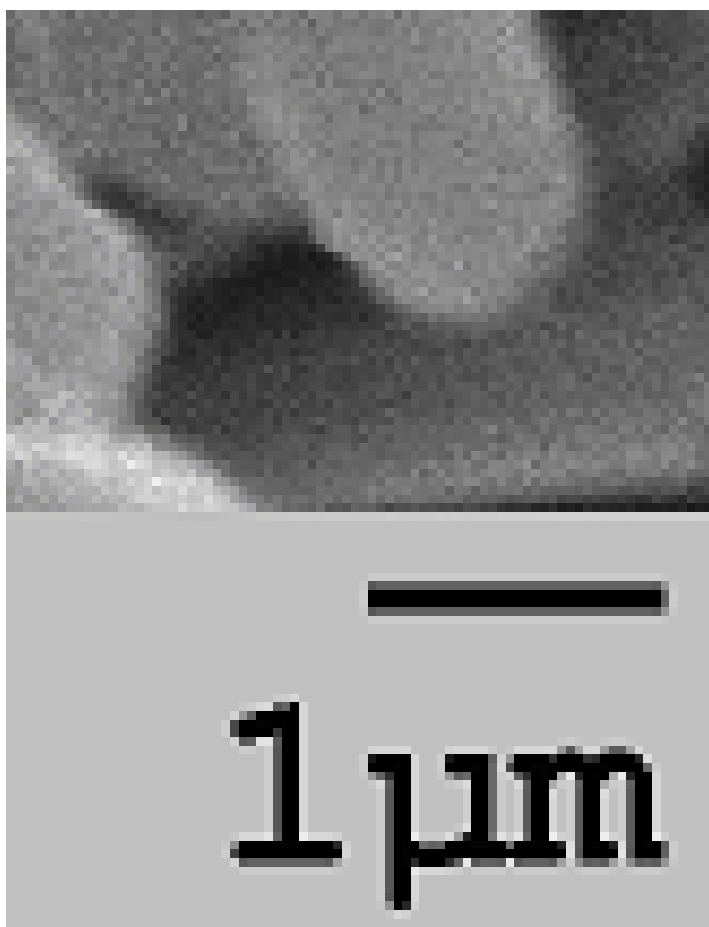


Рис. 7. Увеличенный фрагмент (рамка внизу справа) ЭМС рис. 5

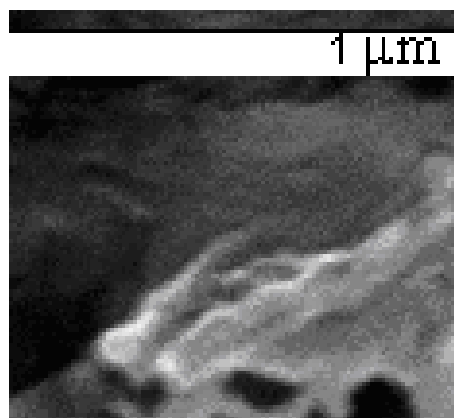


Рис. 8. Увеличенный фрагмент ЭМС рис. 6

На фрагменте рис. 7 наименьшие светлые частички имеют размер около 570 Å, а на рис. 8 – около 130 Å. Как видим, размер гелевых частиц гипса существенно превышает размер частиц гидросиликатов кальция.

По аналогии с равновесными размерами кристаллогидратов гипса [5; 12] можно предположить, что равновесный размер этих частиц определяется действием сил (энергии) латерального электроповерхностного отталкивания потенциалопределяющих ионов ПОИ, электроповерхностного давления, а также силы притяжения ПОИ к решетке частицы. Сила латерального электроповерхностного отталкивания, а, следовательно, равновесный размер частицы b , в свою очередь, определяются абсолютной величиной равновесного электроповерхностного потенциала $\psi_{ЭП}^P$ и расстоянием между ПОИ a_0 :

$$b = \frac{4\epsilon\epsilon_0 a_0^3}{z^2 e^2} f_{ПР}; \quad (1)$$

$$a_0 = \sqrt{\frac{1}{n}} = \sqrt{\frac{d_1 \cdot z_1 \cdot e}{\epsilon_1 \epsilon_0 \varphi_{ЭП}^P}}. \quad (2)$$

С учетом этих выражений отношение равновесных размеров частиц гипса и гидросиликатного геля определится выражением

$$\frac{b_{Гипс}}{b_{ГСК}} = \left(\frac{\psi_{ЭП.Гипс}^P}{\psi_{ЭП.ГСК}^P} \right)^{1,5}. \quad (3)$$

Подставляя потенциалы $\psi_{ЭП}^P$ гипса и низкоосновных гидросиликатов кальция, получим

$$\frac{b_{Гипс}}{b_{ГСК}} = \left(\frac{0,22}{0,1} \right)^{1,5} = 3,26,$$

что соответствует действительному отношению размеров этих частиц по данным ЭМС:

$$\frac{b_{Гипс}}{b_{Гель}} = \frac{570}{160} = 3,56.$$

Следовательно, кристаллогидратные призматические блоки двуводного гипса возникают из пересыщенного раствора вначале в виде гелеобразных, близких к сферическим, частиц, равновесный размер которых около 570×10^{-10} м или 570 Å, из которых затем образуются крупные призматические блоки кристаллогидратов.

Такой механизм кристаллизации через гелевые частицы соответствует данным [13], где показано, что возникновение шарообразных аморфных частиц размером от нескольких сотых мкм до 0,1 мкм – обычное явление при возникновении новой фазы при протекании процесса кристаллизации.

Для визуальной оценки возможности возникновения фазовых контактов между кристалликами $CaSO_4 \times 2H_2O$ из приведенных ЭМС выбраны и увеличены наиболее наглядные фрагменты в местах контакта кристаллогидратов, в частности фрагмент 1 ЭМС рис. 5 (рис. 9), а также фрагменты 1 и 2 ЭМС рис. 10 (рис. 11). Из этих фрагментов видно, что фазовые контакты между кристаллогидратами не возникают. Видно также, что кристаллики образовывались из дисперсной системы, дисперсная фаза в которой состоит из маленьких гелевых частиц (как отмечалось, около 570 Å) за счет их коагуляции.

На основании выявленных нами структурных единиц – небольших гелевых частиц, слагающих кристаллогидратные частицы (блоки), и в развитие представлений [5] полагаем, что для маленьких частиц величина силы $f_{ЛАТ}^{ЭП}$ еще недостаточна для их разрушения. Определяющим является электроповерхностное давление от энергии

гидратации ПОИ $U_{Г.И.}^{ЭП}$. Для проверки этого предположения выполним на основе исходных расчетных положений [5] с учетом энергии гидратации ПОИ

соответствующие расчеты равновесных размеров кристаллогидратных частиц и выявленных нами гелевых частиц и установим критерии их равновесия.

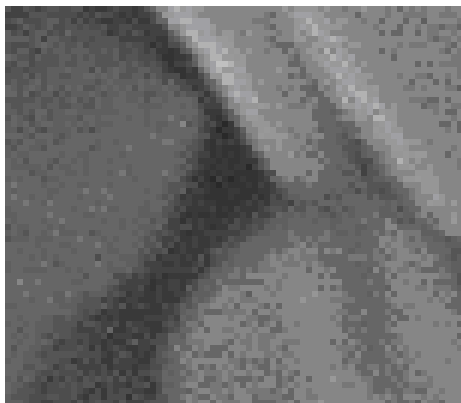


Рис. 9. Увеличенный фрагмент 1 (справа внизу) ЭМС рис. 5

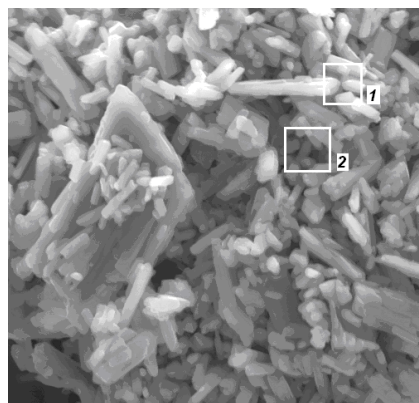
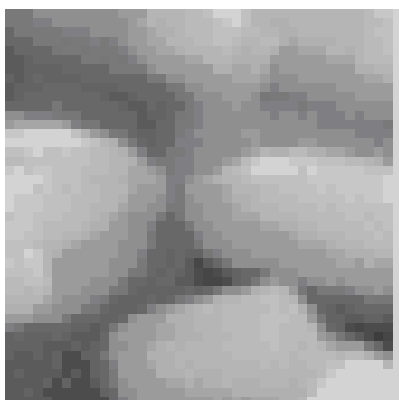


Рис. 10. ЭМС гипса с добавкой хлорида натрия [14]

а)



б)

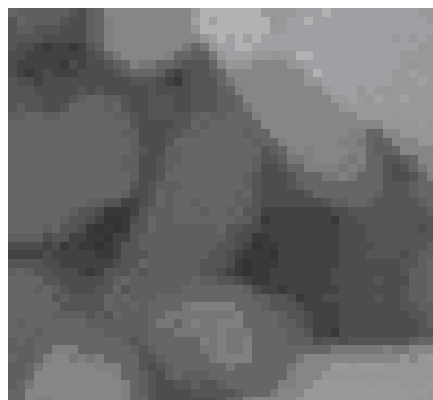


Рис. 11. Увеличенные фрагменты 1 (слева) и 2 (справа) из ЭМС на рис. 10

Равновесный размер гелевых частиц двуводного гипса и определение условий их роста и растворения. По [3], энергия гидратации ПОИ равна

$$u_{Г.ПОИ}^{ЭП} = \frac{U_{Г.И.}}{2 \cdot N_A}, \quad (4)$$

где $U_{Г.И.}$ – энергия гидратации иона Дж/моль;
 N_A – число Авогадро ($9,65 \times 10^4$ 1/моль).

По существу, электроповерхностная энергия гидратации ПОИ представляет собой ион-дипольное притяжение между ПОИ и гидратированными им молекулами воды. Соответственно, в поверхностном слое воды возникает электроповерхностное давление, которое передается во все стороны одинаково и, следовательно, в латеральном (вдоль поверхности), а также вдоль ребра направлении.

Вырежем мысленно на грани призмы (куба) полосу шириной a_0 , равной расстоянию между ПОИ, и длиной, равной длине ребра призмы (размеру гелевой

частицы). Энергия электроповерхностного давления на поверхности этой полосы равна

$$u_{Г.ПОИ}^{ЭП} = \frac{U_{Г.И.}}{2 \cdot N_A \cdot a_0^2} \cdot b_{ГЕЛ} \cdot a_0 = \frac{U_{Г.И.} \cdot b_{ГЕЛ}}{2 \cdot N_A \cdot a_0} \quad (5)$$

Эта давление передается на реберный (угловой) ПОИ Ca^{2+} , стремясь оторвать его от кристаллической решетки, сформированной из элементов $SO_4^{2-}-Ca^{2+}-SO_4^{2-}$ (рис. 12). Отрываясь под влиянием давления, создаваемого электроповерх-

ностной гидратацией ПОИ, реберный ПОИ совершает работу отрыва, равную $f_{ПР} \cdot \delta_{Ca^{2+}-SO_4^{2-}}$.

Сила связи ПОИ с ионом SO_4^{2-} :

$$f_{ПР} = \frac{z_1 \cdot z_2 \cdot e^2}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon \varepsilon_0 \cdot (\delta_{Ca^{2+}-SO_4^{2-}})^2} \cdot 2 \cdot \cos 45^\circ, \quad (6)$$

где z_1 и z_2 – валентности ионов ПОИ Ca^{2+} и аниона SO_4^{2-} ; ε и ε_0 – относительная диэлектрическая проницаемость пространства между этими ионами и электрическая

постоянная, 1 и $8,85 \times 10^{-12}$ Ф/м, соответственно; e – элементарный заряд, $1,6 \times 10^{-19}$ Кл.

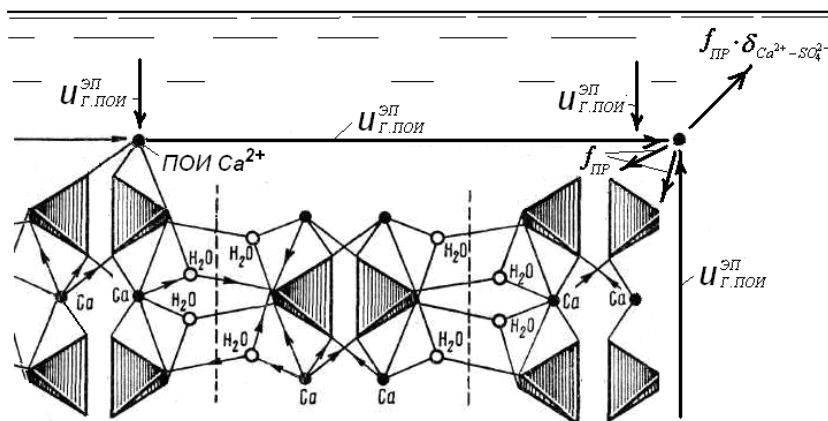


Рис. 12. Схема действия давления от энергии электроповерхностной гидратации ПОИ $u_{Г.ПОИ}^{ЭП}$ и работы отрыва реберного ПОИ $f_{ПР} \cdot \delta_{Ca^{2+}-SO_4^{2-}}$

При этих и ранее вычисленных величинах сила притяжения ПОИ Ca^{2+} к

двум анионам SO_4^{2-} (рис. 12) составит

$$f_{\text{ПР}} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 1,6^2 \cdot 10^{-38}}{4 \cdot 3,14 \cdot 1,8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 3,77^2 \cdot 10^{-20}} \cdot 2 \cdot 0,707 =$$

$$= \frac{10,24 \cdot 10^{-38}}{1580 \cdot 10^{-32}} \cdot 1,41 = 0,91 \cdot 10^{-8} \text{ Н},$$

где 2 отражает связь ПОИ Ca^{2+} с двумя анионами SO_4^{2-} .

В изотермических условиях энергия электроповерхностной гидратации переходит в работу отрыва ПОИ

$$u_{\text{Г.ПОИ}}^{\text{ЭП}} = f_{\text{ПР}} \cdot \delta_{\text{Ca}^{2+}-\text{SO}_4^{2-}}. \quad (7)$$

При подстановке в это уравнение выражения (5) для $u_{\text{Г.ПОИ}}^{\text{ЭП}}$ оно приобретает вид

$$\frac{U_{\text{Г.И}}}{2 \cdot N_A} \cdot \frac{b_{\text{ГЕЛ}}}{a_0} = 2f_{\text{ПР}} \cdot \delta_{\text{Ca}^{2+}-\text{SO}_4^{2-}}, \quad (8)$$

откуда

$$b_{\text{ГЕЛ}} = \frac{4f_{\text{ПР}} \cdot \delta_{\text{Ca}^{2+}-\text{SO}_4^{2-}} \cdot N_A \cdot a_0}{U_{\text{Г.И}}}. \quad (9)$$

Расстояние между ПОИ на продольной грани двухводного гипса определим по выражению (2):

$$a_0 = \sqrt{\frac{2,53 \cdot 10^{-10} \cdot 2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{1,8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,1} \left(\frac{m \cdot K_{\text{л}}}{B} = \frac{m \cdot K_{\text{л}} \cdot m}{K_{\text{л}}} = m^2 \right)} =$$

$$= \sqrt{\frac{8,096 \cdot 10^{-29}}{0,885 \cdot 10^{-12}}} = \sqrt{9,15 \cdot 10^{-18}} = 96 \cdot 10^{-10} \text{ м};$$

При энергии гидратации ПОИ (катиона Ca^{2+}) $U_{\text{Г.И.}} = 1641000$ Дж/моль [15]

$$b_{\text{ГЕЛ}} = \frac{4 \cdot 0,91 \cdot 10^{-8} \cdot 3,77 \cdot 10^{-10} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \cdot 96 \cdot 10^{-10}}{1641000} =$$

$$= \frac{7962 \cdot 10^{-5}}{1,641 \cdot 10^6} = 4,85 \cdot 10^{-8} \text{ м} \approx 500 \text{ \AA},$$

что соответствует среднему размеру наименьших частиц на ЭМС рис. 7.

Частица такого размера является равновесной. При $u_{\text{Г.ПОИ}}^{\text{ЭП}} < f_{\text{ПР}} \cdot \delta_{\text{Ca}^{2+}-\text{SO}_4^{2-}}$ частица растет, а при $u_{\text{Г.ПОИ}}^{\text{ЭП}} > f_{\text{ПР}} \cdot \delta_{\text{Ca}^{2+}-\text{SO}_4^{2-}}$ – растворяется.

Равновесный размер кристаллогидратов двухводного гипса и условия его разрушения и растворения. При росте блока и, соответственно, увеличении размеров увеличивается количество ПОИ

на его поверхности, а, следовательно, увеличивается сила латерального (вдоль поверхности) электроповерхностного отталкивания между ПОИ $f_{\text{ЛАТ}}^{\text{ЭП}}$. Эта сила передается на реберный ПОИ и реберную гелевую частицу. Но т.к. для равновесной гелевой частицы двухводного гипса энергия электроповерхностной гидратации скомпенсирована работой отрыва реберного ПОИ, движущей силой разрушения будет сила латерального электроповерхностного отталкивания

между ПОИ $f_{ЛАТ}^{ЭП}$, величина которой, как отмечалось, увеличивается с увеличением размера блока.

Как отмечалось, строение грани призматического блока двуводного гипса формируют цепи $SO_4^{2-}-Ca^{2+}-SO_4^{2-}$. С

учетом этого представлена схема действия силы латерального электроповерхностного отталкивания $f_{ЛАТ}^{ЭП}$ между ПОИ, действующей на реберный ПОИ или реберную гелевую частицу (рис. 13).

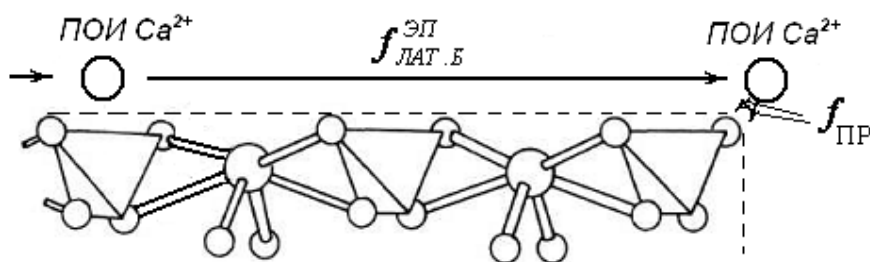


Рис. 13. Уточненная схема действия сил $f_{ЛАТ.Б}^{ЭП}$ и $f_{ПР}$

С учетом этой схемы результирующая сила латерального электроповерхностного отталкивания, действующая на реберный ПОИ, определяется выражением

$$F_{ЛАТ}^{ЭП} = \frac{z^2 e^2 \cdot b}{4\epsilon\epsilon_0 a_0^3} \cdot \cos 45^\circ \cdot N_{ПОИ.БЛ} \quad (10)$$

При увеличении $f_{ЛАТ}^{ЭП}$ сверх определенной величины разрушение блока может происходить как за счет отрыва реберных ПОИ, так и за счет отрыва реберных гелевых частиц в торцевой грани блока, в зависимости от величин силы связи ПОИ с решеткой и частицы с блоком. Сравним эти силы.

Сила притяжения ПОИ к решетке блока определяется выражением

$$F_{ПР} = \frac{z^2 \cdot e^2}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon\epsilon_0 \cdot (\delta_{Ca^{2+}-SO_4^{2-}})^2} \cdot 2 \cdot \cos 45^\circ \quad (11)$$

Подставляя соответствующие величины, получим

$$\begin{aligned} F_{ПР} &= \frac{2 \cdot 2 \cdot 1,6^2 \cdot 10^{-38}}{4 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 3,77^2 \cdot 10^{-20}} \cdot 2 \cos 45^\circ = \\ &= \frac{10,24 \cdot 10^{-38}}{1580 \cdot 10^{-32}} \cdot 1,41 \left[\frac{Кл^2}{м^2} = \frac{Кл \cdot В}{м} = \frac{Н \cdot м}{м} \right] = 6,48 \cdot 10^{-9} = 0,91 \cdot 10^{-8} Н. \end{aligned}$$

Частицы геля связываются друг с другом через слои, в свою очередь связанные через водородные связи –

мостики (рис. 3, 4). С учетом этого сила притяжения между этими частицами

$$F_{ГЕЛ} = f_{ГЕЛ} \cdot N_{ГЕЛ}. \quad (12)$$

В этом выражении $f_{ГЕЛ}$ – сила, приходящаяся на 1 ПОИ:

$$f_{BC} = \frac{dU_{BC}}{d\delta_{BC} \cdot N_A} = \frac{U_{BC}}{\delta_{BC} \cdot N_A}, \quad (13)$$

а $N_{ГЕЛ}$ – количество ПОИ на грани частицы геля (кубической формы):

$$N_{ГЕЛ} = \frac{(b_{ГЕЛ})^2}{a_0^2}. \quad (14)$$

При средней величине энергии водородной связи для воды $U_{BC} = 20000$ Дж/моль и ее длине $l_{BC} = 1,75 \text{ \AA} = 1,75 \cdot 10^{-10} \text{ м}$

$$f_{BC} = \frac{20000}{1,75 \cdot 10^{-10} \cdot 6,02 \cdot 10^{23}} \left(\frac{\frac{\text{Дж}}{\text{моль}}}{\frac{\text{м} \cdot 1}{\text{моль}}} = H \right) = 1,9 \cdot 10^{-10} H,$$

$$N_{ГЕЛ} = \frac{(570 \cdot 10^{-10})^2}{(96 \cdot 10^{-10})} = 35, \quad F_{ГЕЛ} = 2 \cdot 1,9 \cdot 10^{-10} \cdot 35 \cdot 2 \cdot \cos 45^\circ = 133 \cdot 10^{-10} \cdot 1,41 = 1,88 \cdot 10^{-8} H,$$

что превышает силу связи реберного ПОИ с решеткой блока кристаллогидрата на торцевой грани ($0,91 \times 10^{-8} \text{ Н}$). В связи с этим блок в продольном направлении будет разрушаться за счет отрыва реберных ПОИ на торцевой грани, т.е. за счет его растворения, сопровождаясь укорочением.

Подставляя соответствующие величины, из равенства этих силы определены упрощенные выражения для $f_{ЛАТ.Б}^{ЭП}$ продольной и торцевой граней, соответственно:

$$F_{ЛАТ}^{ЭП} = 0,000736 \cdot b(H), \quad (15)$$

$$f_{ЛАТ}^{ЭП} = 0,00368 \cdot b(H). \quad (16)$$

По этим равенствам и величинам $F_{ПР}$ определены поперечный размер двуводного

гипса $b = 2500 \text{ nm}$ ($25000 \text{ \AA} = 2,5 \text{ мкм}$) и продольный $b = 12500 \text{ nm}$ ($1250000 \text{ \AA} = 12,5 \text{ мкм}$).

Выводы. Установлено, что первичными элементами структуры двуводного гипса являются гелевые частицы, формирующие затем за счет уплотнения блоки кристаллогидратов. Фазовые контакты между частицами не возникают. Прочность и водостойкость обусловлены возникновением между частицами единичных электрогетерогенных контактов типа ПОИ– H_2O –ПОИ (между торцевой и продольной гранями) и типа Ca^{2+} – H_2O – SO_4^{2-} (\dots – водородная связь) между продольными гранями частиц кристаллогидратов.

Список литературы

1. Щукин, Е.Д., Коллоидная химия [Текст] / Е.Д. Щукин, А.В. Перцов, Е.А. Амелина. – М: Высшая школа, 2006. – 444 с.

2. Полак, А.Ф. Твердение мономинеральных вяжущих веществ [Текст] / А.Ф. Полак. – М.: Стройиздат, 1966. – 208 с.
3. Плугин, А.Н. Электрогетерогенные взаимодействия при твердении цементных вяжущих [Текст] : дис... докт. хим. наук / А.Н. Плугин. – К.: ИКХХВ, 1989. – 282 с.
4. Плугин, А.А. Долговечность бетона и железобетона в обводненных сооружениях: Коллоидно-химические основы [Текст]: дисс... докт. техн. наук / А.А. Плугин. – Харьков: ХГТУСА, 2005. - 442 с.
5. Плугин, А.Н. Механизм структурообразования и дегидратации гипсовых вяжущих [Текст] / А.Н. Плугин, Х.-Б. Фишер, А.А. Плугин, К.А. Рапина // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. - Харків: УкрДАЗТ, 2010. - Вип. 115. – С. 5-22.
6. О механизме возникновения электроповерхностного потенциала различных веществ в водных растворах [Текст] / А.Н. Плугин, Н.В. Вдовенко, А.И. Бирюков, Ф.Д. Овчаренко // ДАН СССР. – 1988. – Т.298. – №3. – С. 656-661.
7. Бетехтин, А.Г. Курс минералогии [Текст] / А.Г. Бетехтин. – М.: Госгеотехиздат, 1956. – 558 с.
8. Examination of the hygro-mechanical stability of crystalline ... H.-U. Hummel, B. Abdussalamow, Iphofen, H.-B. Fischer, J. Stark, Weimar/Germany. www.bauverlag.de/domains/bauverlag/zk.
9. Mandal Pradip K., Mandal Tanuj K. Anion water in gypsum (CaSO₄·2H₂O) and hemihydrate (CaSO₄·1/2H₂O) / Cement and Concrete Research. – 32. – 2002. – P. 313-316.
10. Microscopy and Spectroscopy of Stream Rocks with Green Coating caveslime.org/VillaLuz/greenslime/-Microscopy and Spectroscopy of Stream Rocks with Green Coating caveslime.org/VillaLuz/greenslime/.
11. Рапіна, К.В. Гіпсові самонівелюючі стяжки з фізико-хімічним стоком вологи [Текст]: автореф. дис... канд. техн. наук / К.В. Рапіна. – Харків: УкрДАЗТ, 2009. – 20 с.
12. Плугин, А.Н., Коллоидно-химические основы прочности и долговечности бетона и конструкций [Текст] / А.Н. Плугин, А.А. Плугин // Строительные материалы. – 2007. - №7 (631). – С. 68-71.
13. Берестнева, З.Я., Электронно-микроскопическое изучение алюмокремниевых гелей [Текст] / З.Я. Берестнева, Т.А. Корецкая, В.А. Каргин // Колл. журн. – 1955. – Т.17. – № 3. – С. 196-199.
14. Hee Tai Eun, Yong Sig Ko. Preparation of Gypsum Using STS Sludge and Waste Sulfuric Acid Produced in Iron & Steel Industry / Ind. Eng. Chem. - V. 9. - № 5. – 2003. – P. 614-618.
15. Измайлов, Н.А. Электрохимия растворов [Текст] / Н.А. Измайлов. – М.: Химия, 1976. – 488 с.

Ключевые слова: двухводный гипс, структура, кристаллогидраты, контакты.

Аннотации

Виконано критичний аналіз існуючих уявлень про структуру гіпсу, в т.ч. про механізм виникнення фазових контактів зрощення між кристаликами двоводного гіпсу. Показана мала ймовірність утворення таких контактів. Встановлено, що первинними елементами структури двоводного гіпсу є гелеві частинки, що формують потім за рахунок ущільнення блоки кристалогідратів. Визначено рівноважні розміри гелевих частинок і блоків кристалогідратів. Встановлено, що міцність і водостійкість гіпсового каменю обумовлені виникненням між частинками одиничних електрогетерогенних контактів між протилежно зарядженими потенціалвизначальними іонами типу $Ca^{2+}-H_2O-SO_4^{2-}$ між торцевою та поздовжньою

гранями блоків і типу $Ca^{2+}-H_2O\cdots SO_4^{2-}$ (\cdots – водневий зв'язок) між поздовжніми гранями частинок кристалогідратів.

Выполнен критический анализ существующих представлений о структуре гипса, в т.ч. о механизме возникновения фазовых контактов срастания между кристалликами двуводного гипса. Показана малая вероятность образования таких контактов. Установлено, что первичными элементами структуры двуводного гипса являются гелевые частицы, формирующие затем за счет уплотнения блоки кристаллогидратов. Определены равновесные размеры гелевых частиц и блоков кристаллогидратов. Установлено, что прочность и водостойкость гипсового камня обусловлены возникновением между частицами единичных электрогетерогенных контактов между противоположно заряженными потенциалопределяющими ионами типа $Ca^{2+}-H_2O-SO_4^{2-}$ (торцевой и продольной гранями блоков) и типа $Ca^{2+}-H_2O\cdots SO_4^{2-}$ (\cdots – водородная связь) между продольными гранями частиц кристаллогидратов.

A critical analysis of existing ideas about the structure of gypsum, including the mechanism of occurrence of accretion phase contacts between crystals of gypsum dehydrate was made. A low probability of formation of such contacts was shown. Found that the primary elements of the structure of gypsum dihydrate are gel particles that form then due to compression of blocks of crystal. The equilibrium gel particle size and crystalline blocks were defined. Found that the strength and water resistance of gypsum due to the emergence of inter-particle single elektroheterogeneous contacts between oppositely charged potential-ions such as $Ca^{2+}-H_2O-SO_4^{2-}$ (front and longitudinal edges of the blocks) and the type of $Ca^{2+}-H_2O\cdots SO_4^{2-}$ (\cdots – hydrogen communication) between the longitudinal edges of crystalline particles.

УДК 666.31

Канд. техн. наук А.А. Баранова (ХНУГХ)

A.A. Baranova

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЧАСТИЦАХ ОБОЖЖЕННОГО ГИПСА

INVESTIGATION OF TEMPERATURE REDISTRIBUTION IN THE CALCINED GYPSUM PARTICLES

Представил д-р техн. наук, профессор А.А. Плугин

Традиционная технология обжига гипса во вращающихся печах, как известно, приводит к значительному ослаблению структуры гипса в связи с резким удалением воды в виде пара. Поэтому технология получения т.н. β -формы

полугидрата сульфата кальция предусматривает остывание гипса после обжига в камере томления, чтобы избежать резкого перепада температуры частиц и еще большего разрушения их кристаллической решетки [1].

Для получения α -формы гипсового вяжущего используют технологии, в которых предусмотрено наличие не только температуры, но и давления, чтобы обеспечить частичное удаление воды в жидком состоянии из сырья. В такой технологии реактор представляет собой динамическую систему, где нет резкого нагрева и резкого остывания, в связи с этим камера томления не предусмотрена [2].

Разработана оригинальная технология получения высококачественного гипса α -формы с реализацией двух процессов теплообработки гипсового сырья.

На первом этапе тепловой обработки в реакторе, который имеет форму усеченного конуса, горячий воздушный поток вносит с широкого конца частицы измельченного гипса и выносит их из реактора через узкое отверстие. Вследствие сужения выходного отверстия реактора в его камере создается давление, необходимое для того, чтобы вода из гипса выделялась в жидком состоянии.

На этом этапе частицы обожженного гипса имеют смешанный химический состав и неравномерное распределение температуры по их глубине, что объясняется особенностью технологии обжига, т.к. время пребывания частиц в реакторе в условиях высокой температуры и давления составляет секунды. К тому же температура теплоносителя всегда выше, чем температура обжига гипса для реализации процесса нагревания частиц сырья в результате теплопроводности.

Таким образом, образуется многофазная структура обожженного гипса, модель которого приведена на рис. 1.

Как показано на рис. 1, на поверхности частицы радиусом R образуется слой безводного гипса (растворимого сульфата кальция) толщиной от R до R_2 , затем слой полуводного гипса от R_2 до R_1 , а центральная часть зерна представлена исходным двуводным гипсом радиусом R_1 .

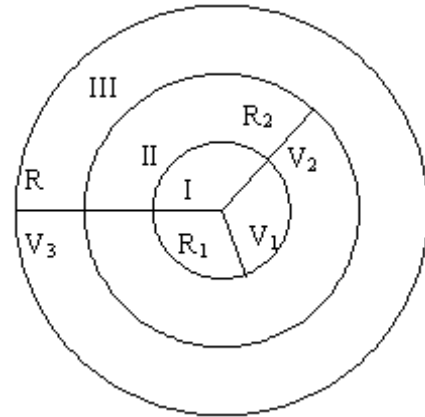


Рис. 1. Модель многофазной структуры частицы гипса после обжига в реакторе-конфузоре

Поэтому возникла необходимость введения в технологическую схему камеры томления, которая выполняет функцию второго реактора для выравнивания температуры в частицах и корректировки их химического состава.

Задачей тепловой обработки гипсового сырья является создание условий образования полуводного гипса по всему объему частицы. Для этого молекулы воды, которые выделяются при дегидратации в результате диффузии из центральной зоны, должны попасть в наружный слой, чтобы в нем произошла реакция образования полуводного гипса. Это возможно в случае перераспределения температур в частице, для чего в технологической схеме и предусмотрена камера томления. Режим обжига в реакторе-конфузоре должен обеспечивать согласованность размеров зон друг с другом для того, чтобы количество воды, выделяемой в центральной зоне, было необходимо и достаточно для образования полуводного гипса в наружном слое.

С этой целью были проведены исследования по изменению кристаллической структуры, плотности и линейных размеров частиц гипса в результате обжига при различных температурах. Установлено, что линейные

размеры частиц гипса практически не изменяются, а плотность уменьшается пропорционально количеству удаленной физической и гидратной воды. Поэтому можно принять, что изменение плотности различных зон зависит от количества

гидратной воды, т.е. пропорционально молярной массе растворимого ангидрита, полуводного и двуводного гипса.

Молярные массы молекул частиц во всех зонах и объемы зон приведены в таблице.

Таблица

Описание зон частицы гипса после обжига в реакторе-конфюзоре

Наименование фазы материала	Химическая формула	Молярная масса, г/моль	Объем фаз в частицах
I зона – двуводный гипс	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	172	$V_1 = 4/3\pi R_1^3$
II зона – полугидрат сульфата кальция	$\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$	145	$V_2 = 4/3\pi(R_2^3 - R_1^3)$
III зона – растворимый ангидрит	CaSO_4	136	$V_3 = 4/3\pi(R^3 - R_2^3)$

Разница гидратной воды H_2O в зонах I и II составляет 27 г/моль, а в зонах II и III – 9 г/моль. Следовательно, для выравнивания содержания гидратной воды в I и III зонах необходимо следующее соотношение их объемов: $3V_1=V_3$, т. е.

$$\pi R_1^3 = 4/3\pi R^3 - 4/3\pi R_2^3. \quad (1)$$

Отсюда

$$3R_1^3 + R_2^3 = R^3, \quad R_2 = \sqrt[3]{R^3 - 3R_1^3}.$$

Примем размер частицы за 1, $R = 1$, тогда

$$R_2 = \sqrt[3]{1 - 3R_1^3}. \quad (2)$$

В интервале температур от 115° до 210°С получаем полуводный гипс, при изменении температур от 210° до 350°С α -обезвоженный полугидрат и α -растворимый ангидрит. Поэтому в зоне I температура должна быть ниже 115°С, в

зоне II – 115-210°С, а в зоне III – 210-350°С [2].

В предельном случае, когда отсутствует зона II, т.е. $R_2 = R_1$, получаем:

$$R_2 = \sqrt[3]{1 - 3R_2^3}, \quad 4R_2^3 = 1, \quad R_2^3 = 1/4,$$

$$R_2 = \frac{\sqrt[3]{2}}{2}. \quad (3)$$

На основании теоретических исследований и расчетов, а также путем экспериментального определения модификационного состава обожженного гипса в конусообразном реакторе была построена зависимость распределения температуры при различных соотношениях фаз в частицах материала. На рис. 2 приведен график распределения температуры внутри частиц при различных значениях R_1 и R_2 , общий радиус частицы принимаем за единицу.

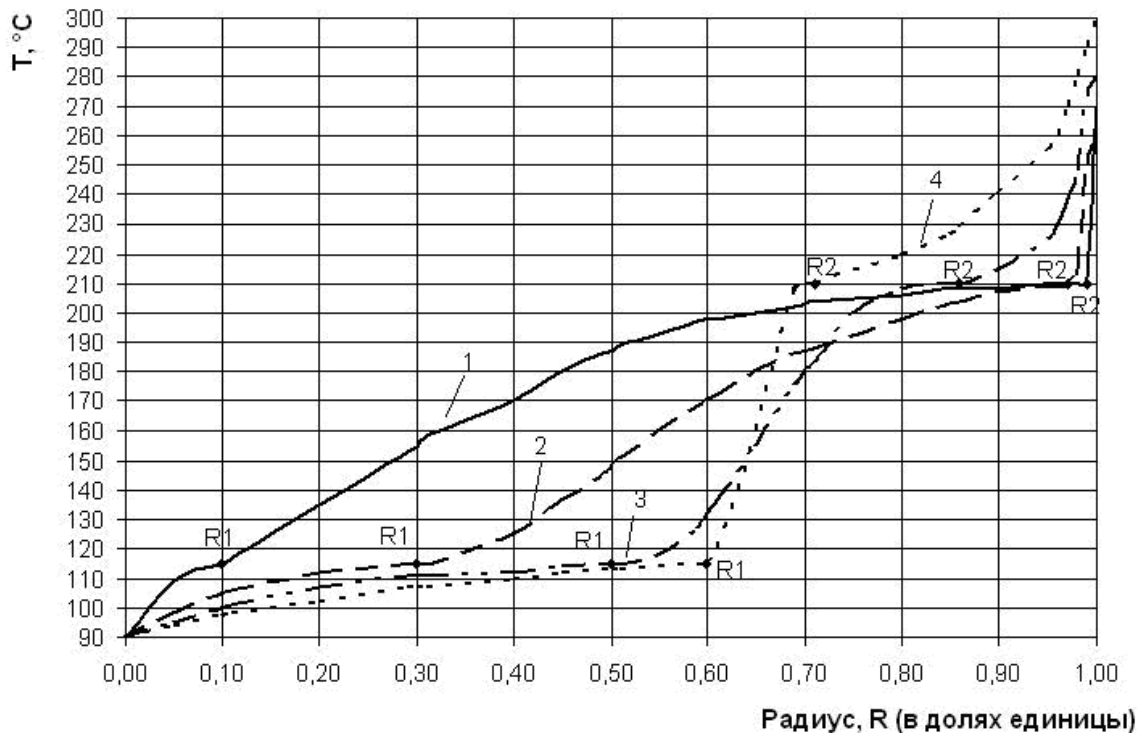


Рис. 2. Зависимости распределения температуры при различных соотношениях фаз в частицах обожженного гипса:

1 – $R_1 = 0,1$, $R_2 = 0,999$; 2 – $R_1 = 0,3$, $R_2 = 0,97$; 3 – $R_1 = 0,5$, $R_2 = 0,855$; 4 – $R_1 = 0,6$, $R_2 = 0,71$

Частицы различного диаметра находятся в конусообразном реакторе разное время. Время нахождения частицы зависит от высоты реактора, скорости теплоносителя и ее скорости витания. Скорость движения частицы равна разности скорости потока теплоносителя и скорости витания. Поэтому распределение температуры в частице будет зависеть от ее размера и режима теплообработки (температуры теплоносителя и скорости его движения). Анализ рис. 2 показывает одинаковый качественный характер распределения температуры внутри частицы. Рост температуры в интервале до 110 – 115 °C наблюдается при изменении радиуса частицы от 0 до R_1 . В окрестности точки R_1 наблюдается замедление роста температуры из-за фазовых превращений двуводного гипса в полуводный. Затем наблюдается равномерный рост температуры до точки R_2 , соответствующий температуре 200-210°C

фазового превращения полуводного гипса в растворимый ангидрит. При точках от R_2 и более наблюдается рост температур до 230-300°C. Кривые 1 и 2 характерны для процесса нагревания мелких частиц, которые находятся непродолжительное время в конусообразном реакторе. В этом случае объем полуводного гипса составляет от 99,6-89,2 % (R_1 изменяется от 0,1 радиуса частицы до 0,3, а R_2 соответственно от 0,999 до 0,972). Кривые 3 и 4 характерны для процесса нагревания крупных частиц, находящихся дольше на первой стадии термообработки, содержание полуводного гипса находится в пределах 13,6-50 %. При соблюдении соотношений между R_1 и R_2 будет обеспечено выравнивание химического состава обожженного гипса в камере томления и получен полуводный гипс. С этой целью были разработаны математические модели нагревания частицы в реакторе-конфузоре

[3] и необходимого времени пребывания частиц в камере томления [4].

Математическая модель нагрева частицы гипса в реакторе была получена в результате решения уравнения теплопроводности путем использования метода Фурье.

Необходимо учитывать, что для каждой модификации гипса (ангидрита, полуводного и двуводного гипса) существуют различные значения удельной теплоемкости, плотности и коэффициента теплопроводности, причем вышеуказанные характеристики зависят еще и от температуры. Поэтому моделирование осуществлялось послойно, причем результаты расчета для i -того слоя использовались в постановке краевой задачи для следующего $(i+1)$ слоя.

Модель необходимого времени пребывания частиц в камере томления с целью выравнивания температурного поля в частице гипса строилась как суперпозиция трех задач. Первая задача – продолжающийся нагрев и дегидратация шаровидной зоны в центре частицы для двуводного гипса (с переходом его в полуводный) радиусом R_1 . Эта задача решается аналогично решению задачи

нагрева в реакторе, только при других краевых и начальных условиях.

Вторая задача – остывание наружного слоя безводного гипса (ангидрита) и насыщение его молекулами воды с образованием полуводного гипса.

Третья задача – остывание слоя полуводного гипса.

Вторая и третья задачи решаются на базе краевой задачи в сферических координатах об остывании шара, на поверхности которого поддерживается заданная температура.

Выводы. Разработана двухстадийная технология тепловой обработки гипса. Такой подход значительно сокращает время обжига сырого гипса и позволяет управлять процессом обжига, в зависимости от влажности и крупности частиц исходного сырья.

Предложена методика определения необходимого распределения температур в частицах гипса после обжига на первом этапе для условий их оптимальной теплообработки на втором этапе в камере томления. Рассчитано необходимое соотношение между объемами различных фаз в частице гипса для получения высококачественного полуводного гипса.

Список литературы

1. Кокшарев, В.Н. Тепловые установки [Текст] / В.Н. Кокшарев, А.А. Кучеренко. – К.: Вища школа, 1990. – 335 с.
2. Ферронская, А.В. Гипсовые материалы и изделия (производство и применение) [Текст]: справочник / А.В. Ферронская. – М., 2004 – 485 с.
3. Кондращенко, Е.В. Перспективы энергосбережения при производстве гипсовых вяжущих [Текст] / Е.В. Кондращенко, А.А. Баранова // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА, 2006. – Вип. 36. – С. 60-65.
4. Кондращенко, Е.В. Теоретические основы тепловой обработки гипсового вяжущего [Текст] / Е.В. Кондращенко, А.Н. Баранов, А.А. Баранова // Коммунальное хозяйство городов. – К.: Техника, 2007. – Вип. 76. – С. 132-138.

Ключевые слова: многофазная структура, двухстадийная технология, камера томления, распределения температуры.

Анотації

В статті наведена розроблена оригінальна технологія випалу гіпсового в'язучого. Розроблено метод, який описує необхідне розподілення температури в частках гіпсу після випалу на першому етапі для умов їх теплообробки на другому етапі. Розраховано відношення між об'ємами різних зон у частці гіпсу для отримання α -полугідрату сульфату кальцію.

В статье приведена разработанная оригинальная технология обжига гипсового вяжущего. Разработан метод, который описывает необходимое распределение температуры в частицах гипса после обжига на первом этапе для условий их тепловой обработки на втором этапе. Рассчитано отношение между объемами разных зон в частице гипса для получения α -полугидрата сульфата кальция.

Designed original technology of the burning gypsum binding is brought in the paper. The designed method, witch is describing the temperature distribution in the particles of the gypsum after burning on the first stage for conditions their calcining on the second stage. Correlation between volumes of the different zones in particles of the gypsum for reception α -hemihydrate of sulphate calcium was calculate.

УДК 691:66-96

*Д-р техн. наук Л.Й. Дворкін,
канд. техн. наук А.В. Мироненко,
асп. Ю.О. Степасюк (НУВГП)*

*L.I. Dworkin, A.V. Mironenko,
Y.O. Stepasyuk*

**СПОСОБИ ПІДВИЩЕННЯ МІЦНОСТІ НИЗЬКОКЛІНКЕРНОГО
ШЛАКОПОРТЛАНДЦЕМЕНТУ**

**WAYS TO IMPROVE THE STRENGTH OF LOW-CLINKER SLAG
PORTLAND CEMENT**

Основною тенденцією сучасного розвитку будівельної промисловості та будівництва є їх перехід на економні енергоресурсозберігаючі технології виробництва будівельних матеріалів. Значна частина потреб у сировинних матеріалах може задовольнятися за рахунок широкого використання вторинних ресурсів і відходів промисловості.

Одним із найбільш затребуваних матеріалів у сучасному будівництві є

портландцемент. Виробництво цементного клінкеру, як напівфабрикату для виготовлення портландцементу, вимагає високих затрат палива і енергії, що призводить до значного збільшення собівартості цементу, тому актуальним є вирішення проблеми його раціонального використання.

Зменшення витрати клінкеру досягається використанням змішаних та композиційних цементів. З них найбільш

широко використовують шлакопортландцемент (ШПЦ).

В останній редакції стандарту України ДСТУ Б В.2.7-46:2010 так само, як і в європейських нормах EN 197-1, передбачений шлакопортландцемент "ШПЦ Ш/В" із вмістом портландцементного клінкеру в межах 5-19%. Економічна доцільність використання такого в'язучого також не викликає сумнівів. Для отримання 1 кВт·год електроенергії на електростанціях України затрачається від 0,3... 0,37 кг умовного палива, енергозатрати на отримання клінкеру становлять 120...140 кг ум.п/т для заводів сухого способу та до 240 кг для заводів мокрого способу [4]. При економії 50% клінкеру зменшення енергозатрат на його отримання складе 60...120 кг ум.п./т.

Відомо, що для підвищення активності ШПЦ, особливо з максимальним вмістом шлаку і, відповідно, мінімальним – клінкеру, велике значення має встановлення оптимального вмісту сульфатного компонента, тонкості помелу

складових цементу і вибір відповідного модифікатора. Позитивний ефект досягається при введенні в процесі помелу шлакових цементів добавок пластифікаторів та прискорювачів твердіння.

Метою даної роботи було вивчення комплексного впливу на міцність малоклінкерного шлакопортландцементу вмісту клінкеру, сульфатного активатора, а також інтенсифікатора твердіння, питомої поверхні і суперпластифікатора, а також, дослідження впливу виду та кількості прискорювача твердіння на міцнісні характеристики в'язучого.

В дослідженнях використовували гранульований доменний шлак Криворізького металургійного комбінату. Як цементний клінкер (Кл) використовували клінкер Здолбунівського заводу "ПАТ Волинь-Цемент". Як сульфатний компонент ШПЦ застосовували фосфогіпс-дигідрат (ФГ) Рівненського ПАТ "Азот". Хімічний склад матеріалів наведений в табл. 1.

Таблиця 1

Хімічний склад матеріалів

Матеріал	Вміст оксидів, мас. %							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	MnO	P ₂ O ₅
Шлак	39,52	6,49	0,12	47,13	3,10	1,74	1,15	-
Фосфогіпс	-	0,36	0,15	38,4	0,003	59,7	-	0,67
Клінкер	22,47	5,26	4,07	66,18	0,64	0,46	0,29	-

За модулем основності шлак є основним (модуль основності $M_0=1,1$) з коефіцієнтом якості $K=1,44$.

Середній вміст мінералів у клінкері складає, мас. %: $C_3S - 57,09$; $C_2S - 21,22$; $C_3A - 6,86$, $C_4AF - 12,20$.

Як пластифікуючу добавку було використано суперпластифікатор СП-1(С-3) Новомосковського підприємства "Полипласт", а також гіперпластифікатор на полікарбоксилатній основі – Sika VK 225.

Як добавки – регулятори твердіння в наших дослідженнях використовувалися такі прискорювачі: солі хлоридів кальцію та заліза, сульфатів натрію та заліза, а також фториду кальцію та кремній фториду натрію.

Основні дослідження були виконані із застосуванням математичного планування експерименту. Для цього був реалізований трирівневий п'ятифакторний план $Na-5$ [3], умови планування якого наведені в табл. 2.

Умови планування експерименту

№	Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
	Натуральні	Кодовані	-1	0	+1	
1	Вміст клінкеру, %	X ₁	5	12	19	7
2	Вміст фосфогіпсу в перерахунку на SO ₃ , %	X ₂	3,12	4,67	6,23	1,55
3	Питома поверхня в'язучого, м ² /кг	X ₃	300	400	500	100
4	Вміст інтенсифікатора твердіння (CaF ₂), %	X ₄	0	1	2	1
5	Вміст суперпластифікатора С-3, %	X ₅	0	0,5	1	0,5

Після проведення обробки і статистичного аналізу експериментальних даних отримані математичні моделі міцності на згин та стиск стандартних

розчинів на основі досліджуваних в'язучих у вигляді поліноміальних рівнянь регресії, які наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Експериментально-статистичні моделі міцності розчинів на малоклінкерному шлакопортландцементі

Вихідні параметри	Статистичні моделі
Водоцементне відношення	$V/C=0,36+0,01X_3+0,01X_4-0,03X_5-0,01X_2^2+0,02X_3^2-0,02X_4^2+0,01X_1X_2$
Міцність на стиск у віці 28 діб	$R_{ct}^{28}=32,19+5,73X_1-0,7X_2+1,49X_3+0,22X_4+1,19X_5-3,32X_1^2-2,42X_2^2-3,22X_3^2-4,17X_4^2+1,33X_5^2-0,65X_1X_2-1,53X_1X_3-2,69X_1X_4-0,55X_1X_5+1,28X_2X_3+0,4X_2X_4-3,65X_2X_5-0,86X_3X_4+0,2X_3X_5+2,91X_4X_5$

Графічні залежності, які ілюструють вплив технологічних факторів на водоцементне відношення та міцність малоклінкерного ШПЦ на стиск у віці 28 діб, наведені на рис. 1, 2.

Аналізуючи графіки, наведені на рис. 1, приходимо до висновку, що збільшення вмісту клінкеру суттєво не впливає на водоцементне відношення. Суттєвий вплив на нього має величина питомої поверхні в'язучого. При збільшенні питомої поверхні до величини 400 м²/кг водопотреба в'язучого знижується, що пов'язано із збільшенням пластичності розчинів при збільшенні дисперсності частинок в'язучого, проте

надмірне її збільшення призводить до різкого зростання В/Ц. Також до деякого зростання водопотреби призводить збільшення вмісту активізатора твердіння фториду кальцію. Вплив даних двох факторів має екстремальний характер. Збільшення вмісту фосфогіпсу до величини 7,5 % (4,63 % у перерахунку на SO₃) у загальній масі в'язучого призводить до незначного збільшення В/Ц, це збільшення пов'язане з утворенням підвищеної кількості еtringіту в результаті взаємодії алюмінатної складової цементного клінкеру з сульфатною складовою фосфогіпсу. Проте коли алюмінатна складова повністю витрачається на його

утворення, то подальше збільшення вмісту фосфогіпсу веде до незначного зниження В/Ц. За таких умов для зниження кількості води, необхідної для отримання розчину з розпливом конусу рівним 106-115 мм доцільним є введення суперпластифікатора С-3, що дозволяє зменшити водопотребу

від В/Ц=0,39 до В/Ц=0,33, або гіперпластифікатора Sika VK 225, що дозволяє зменшити водопотребу до В/Ц=0,25 і, відповідно, збільшити міцність зразків. Вплив суперпластифікатора на В/Ц найбільший і він має практично лінійний характер (рис. 1).

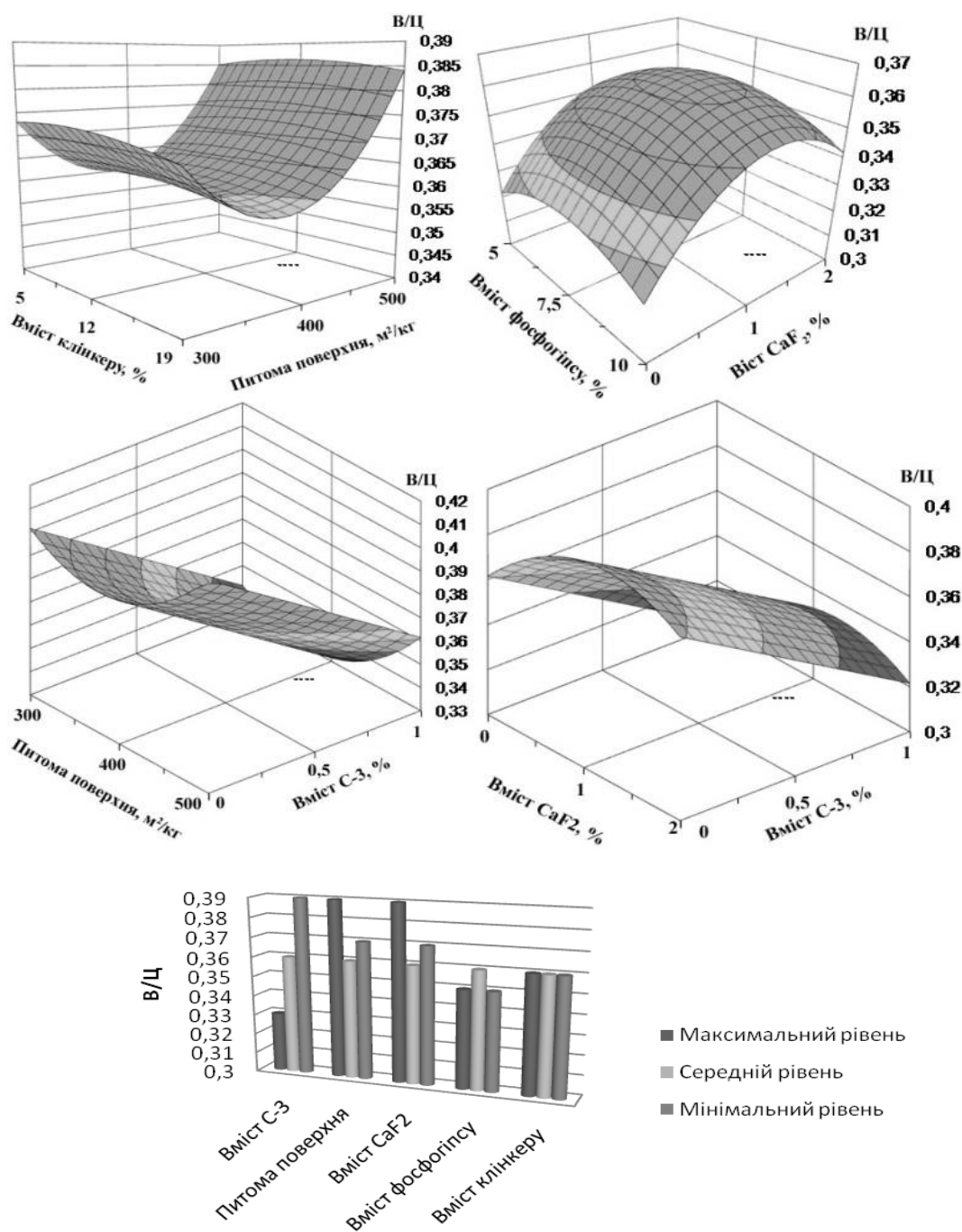


Рис. 1. Вплив технологічних факторів на водоцементне відношення розчинів на основі малоклінкерного шлакопортландцементу

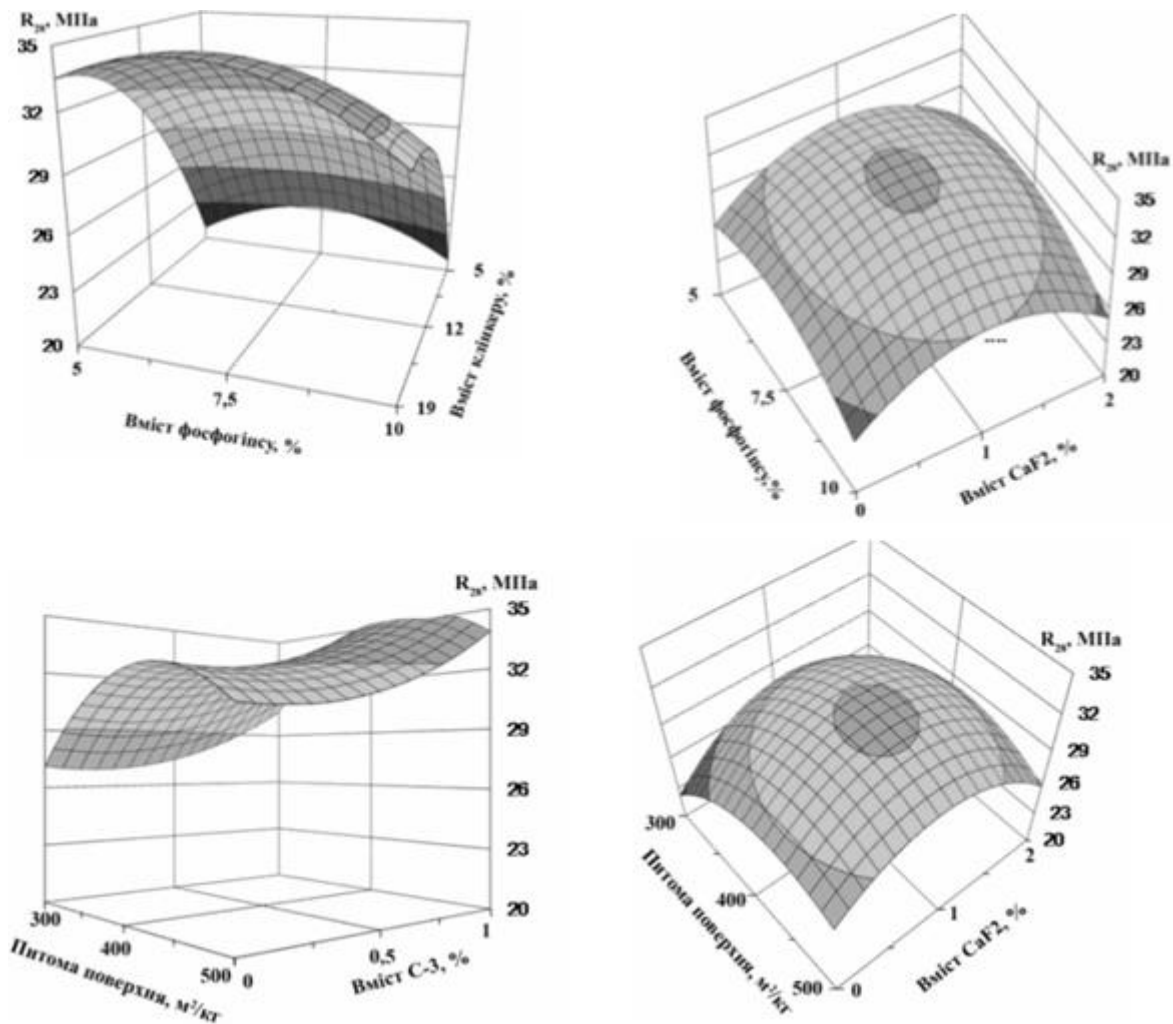


Рис. 2. Вплив технологічних факторів на міцність зразків у віці 28 діб, виготовлених на основі малоклінкерного шлакопортландцементу

Аналізуючи наведені на рис. 2 графіки, приходимо до висновку, що найбільший вплив на активність малоклінкерного шлакопортландцементу має вміст клінкеру у в'язучому, при збільшенні якого міцність ШПЦ збільшується на 10-15%. Також позитивно на міцність впливає збільшення вмісту добавки фториду кальцію, оптимальний вміст якої складає 1% від маси в'язучого. Подальше збільшення його вмісту призводить до спаду міцності зразків, що пояснюється збільшенням водопотреби суміші. Також зростанню міцності сприяє збільшення питомої поверхні в'язучого, але це призводить до зростання В/Ц суміші,

тому для підвищення активності ШПЦ доцільне введення суперпластифікатора, що дозволяє зменшити його водопотребу. Оптимальна витрата суперпластифікатора у складі в'язучого становить 1%. Збільшення вмісту фосфогіпсу до 7,5% (4,63% у перерахунку на SO₃) призводить до збільшення активності в'язучого, але подальше його зростання негативно впливає на міцність.

Також в даній роботі було виконано ряд дослідів по встановленню впливу прискорювачів твердіння на міцнісні характеристики в'язучого з різною величиною питомої поверхні: 300-320 м²/кг та 400-450 м²/кг. При цьому

використовувалось в'яжуче такого складу: клінкер – 12 %, доменний гранульований шлак – 88 %, фосфогіпс – 7,5 % (4,63 в перерахунку на SO₃), вміст суперпластифікатора С-3 – 1 %. Результати досліджень наведені в табл. 4.

Отримані результати вказують на те, що на міцність малоклінкерного шлакопортландцементу найбільш суттєво впливає величина питомої поверхні, при її збільшенні від 300-320 м²/кг до 400-450 м²/кг міцність збільшується майже удвічі. Проте збільшити міцність вяжучого з питомою поверхнею 300-320 м²/кг можна, використовуючи прискорювачі твердіння.

Наші дослідження показали, що найбільш ефективним прискорювачем твердіння, при такій величині питомої поверхні, для малоклінкерного шлакопортландцементу є кремнійфтористий натрій (Na₂SiF₆). Міцність в'яжучого при збільшенні його вмісту до величини 2 % зростає більше ніж в 1,5 рази, але подальше збільшення вмісту Na₂SiF₆ призводить до зниження міцності, що пов'язано зі збільшенням В/Ц. Із збільшенням питомої поверхні вплив прискорювачів твердіння на міцнісні характеристики в'яжучого стає незначним.

Таблиця 4

Вплив добавок прискорювачів твердіння на міцність малоклінкерного шлакопортландцементу

№	Добавка		Питома поверхня 300 м ² /кг				Питома поверхня 400 м ² /кг					
			В/Ц	Міцність при згині, МПа		Міцність при стиску, МПа		В/Ц	Міцність при згині, МПа		Міцність при стиску, МПа	
	Вид	Вміст, мас. %		7 діб	28 діб	7 діб	28 діб		7 діб	28 діб	7 діб	28 діб
1	Без добавок (контрольний)	-	0,33	5,1	0,33	16,3	25,4	0,32	7,4	32,8	10,8	48,3
2	Na ₂ SiF ₆	1,0	0,35	7,1	9,5	28,4	33,2	0,34	6,5	9,0	26,0	44,1
3	Na ₂ SiF ₆	2,0	0,38	6,8	9,5	29,6	44,3	0,37	7,4	9,0	21	45,6
4	Na ₂ SO ₄	1,0	0,36	5,6	9,6	20,2	40,8	0,34	8,6	10,8	26,6	48,3
5	Na ₂ SO ₄	2,0	0,36	5,0	8,4	16,2	36,0	0,36	7,4	11,1	26,2	47,5
6	Fe ₂ (SO ₄) ₃	1,0	0,34	5,4	8,9	17,6	40,5	0,34	7,7	10,1	27,6	46,7
7	Fe ₂ (SO ₄) ₃	2,0	0,36	5,2	8,8	13,4	21,8	0,36	6,5	11,2	24,2	42,1
8	CaCl ₂	1,0	0,31	4,0	8,2	15	23,6	0,35	5,1	9,9	16,5	41,8
9	CaCl ₂	2,0	0,32	4,7	8,6	22	23,4	0,36	5,1	10,0	26,0	41,3
10	FeCl ₃	1,0	0,34	4,9	8,6	19	23,8	0,34	9,2	10,2	31,4	45,1
11	FeCl ₃	2,0	0,35	4,7	8,9	19,2	19,7	0,36	8,1	10,7	29,2	47,4

Висновок. Дослідження показали можливість отримання малоклінкерного шлакопортландцементу активністю більше 50 МПа із застосуванням двокомпонентних добавок-модифікаторів: суперпластифікатора С-3 та активізатора твердіння фториду

кальцію (CaF₂). При цьому в'яжуче має такий склад: вміст клінкеру – 12 %, вміст доменного гранульованого шлаку – 88 %, вміст фосфогіпсу – 7,5 % (в перерахунку на SO₃ – 4,63 %). Питома поверхня в'яжучого складає 400-450 м²/кг, витрата добавки

суперпластифікатора С-3 – 1%, та добавки активізатора твердіння фториду кальцію (CaF_2) – 1% від загальної маси в'язучого. Було встановлено можливість отримання малоклінкерного шлакопортландцементу активністю більше 40 МПа із застосуван-

ням добавок – прискорювачів твердіння, найбільш ефективним з яких є кремній фтористий натрій (Na_2SiF_6). Питома поверхня в'язучого при цьому складає 300-320 м²/кг.

Список літератури

1. Рунова, Р.Ф. В'язучі речовини [Текст]: підручник / Р.Ф. Рунова, Л.Й. Дворкін, О.Л. Дворкін, Ю.Л. Носовський. – К.: Основа, 2012.
2. Дворкін, Л.Й. Використання техногенних продуктів у будівництві [Текст] / Л.Й. Дворкін, О.Л. Дворкін, К.К. Пушкарьова, М.О. Кочевих, М.А. Мохорт, М.П. Безсмертний. – Рівне: НУВГП, 2009.
3. Дворкін, Л.Й. Розв'язування будівельно-технологічних задач методами математичного планування експерименту [Текст] / Л.Й. Дворкін, О.Л. Дворкін, В.В. Житковський. – Рівне: НУВГП, 2011.
4. Дворкин, Л.И. Снижение расхода цемента и топлива в производстве сборного железобетона. – К.: Вища школа, 1985.

Ключові слова: енергозбереження, шлакопортландцемент, клінкер, фосфогіпс, добавки-модифікатори.

Анотації

В статті наведені результати досліджень шлакопортландцементу зі вмістом клінкеру 5-19 %. Визначені оптимальні склади і параметри виробництва та запропоновані комплексні добавки – модифікатори для отримання шлакопортландцементу з активністю до 50 МПа.

В статье приведены результаты исследований шлакопортландцемента с содержанием клинкера 5-19 %. Определены оптимальные составы и параметры производства, предложены комплексные добавки-модификаторы для получения шлакопортландцемента с активностью до 50 МПа.

In the article are presented the results of Slag Portlandcement studies with clinker content 5-19%. The optimal compositions and technological parameters and additives - modifiers for low clinker Slag Portlandcement with activity up to 50 MPa are proposed.

УДК 666.941

*Д-р техн. наук Г.М. Шабанова,
кандидати техн. наук В.В. Тараненкова,
О.О. Гапонова (НТУ «ХП»)*

*G.M. Shabanova, V.V. Taranenkova,
O.O. Gaponova*

ВИСОКОЕФЕКТИВНІ МАГНЕЗІАЛЬНІ В'ЯЖУЧІ МАТЕРІАЛИ НА ОСНОВІ ВІТЧИЗНЯНОЇ СИРОВИНИ

HIGH MG BINDING MATERIALS BASED ON DOMESTIC RAW MATERIALS

У зв'язку з високими цінами на основний компонент сучасного будівництва – цемент, що обумовлено високими цінами на сировину та енергоносії, необхідний пошук шляхів здешевлення вітчизняних в'язучих матеріалів за рахунок використання місцевих сировинних ресурсів та відходів різних виробництв. Магнезіальний цемент дає можливість застосування відходів лісопильного, металургійного та інших видів виробництв у доброякісні будівельні матеріали.

Традиційно магнезіальні в'язучі виготовляються з магнезиту шляхом його випалу та отримання каустичного продукту, який замішується розчином хлоридів або сульфатів магнію. Але через відсутність у нашій країні покладів магнезиту в Україні не набуло поширення виробництво магнезіальних в'язучих. Проте магнезиту знайдена гідна альтернатива – доломіт, дешевий і поширений на Україні мінерал, з якого при випалюванні отримують каустичний доломіт. Окрім того, використання як замішувача розчину природного мінералу бішофіту $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ замість кристалічного хлориду магнію дозволить суттєво знизити собівартість в'язучого [1].

У зв'язку з вищевикладеним метою нашого дослідження була розробка

високоєфективних магнезіальних в'язучих матеріалів на основі сировинних ресурсів України.

У роботі для отримання каустичного доломіту використовувався доломіт ПАТ «Докучаєвський флюсо-доломітовий комбінат» (м. Докучаєвськ, Донецька обл.). Комбінат розробляє найбільше у Європі Єленівське, а також Стилівське родовища вапняків та доломітів. Обсяг виробництва досягає 7 млн 643 тис. т/р. Хімічний склад використаного доломіту (мас. %): CaO – 34,40; MgO – 17,60; SiO_2 – 0,77; Al_2O_3 – 0,50; Fe_2O_3 – 0,29, ВПП – 44,9-45,7.

Як замішувач використовувався розчин природного мінералу бішофіту Новоподольського родовища (Чернігівська обл.) такого складу (мас. %): $MgCl_2$ – 36,20; $CaSO_4$ – 0,05; KCl – 0,31; $NaCl$ – 0,59. В Чернігівській обл. відзначено наявність 1171,7 млн тонн прогнозних ресурсів сирової руди бішофіту.

Доломіт Єленівського родовища досліджувався з використанням рентгенографічного та диференціально-термічного методів аналізу. Як свідчать отримані результати, на рентгенограмі спостерігаються дифракційні максимуми, що відповідають доломіту $CaMg[CO_3]_2$ ($d \cdot 10^{-10} m$ = 1,444; 1,789; 1,8057; 2,017; 2,194; 2,886; 3,698) та кальциту $CaCO_3$

($d \cdot 10^{-10}_M = 1,517; 1,626; 1,912; 2,095; 2,442; 3,035; 3,857$).

На дериватограмі доломіту спостерігаються два ендоефекти при температурі 820 °С та 960 °С: перший ендоефект відповідає дисоціації $MgCO_3$, а другий ендоефект - $CaCO_3$ [2]. Таким чином, основними мінералами дослідженого доломіту Єленівського родовища є доломіт та кальцит.

В результаті проведеного петрографічного аналізу невипаленого доломіту (рис. 1) було встановлено, що порода складається з мінералу доломіту, розміри зерен якого коливаються від 0,001

до 1 – 2 мм. Переважають породи, що складаються зернами середнього розміру (від 0,01 до 0,3 мм). Під мікроскопом видно, що серед пелітоморфної та дрібнозернистої цементуючої маси доломіту спостерігаються крупні зерна доломіту. Зерна доломіту мають ідіоморфні обриси та тріщини спайності по ромбедру. За технологічною класифікацією, запропонованою Г.В. Куколевим [3], та проведеним аналізом визначено, що досліджуваний доломіт можна віднести до групи доломітів середньокристалічних з розміром зерен 0,1 – 0,25 мм.

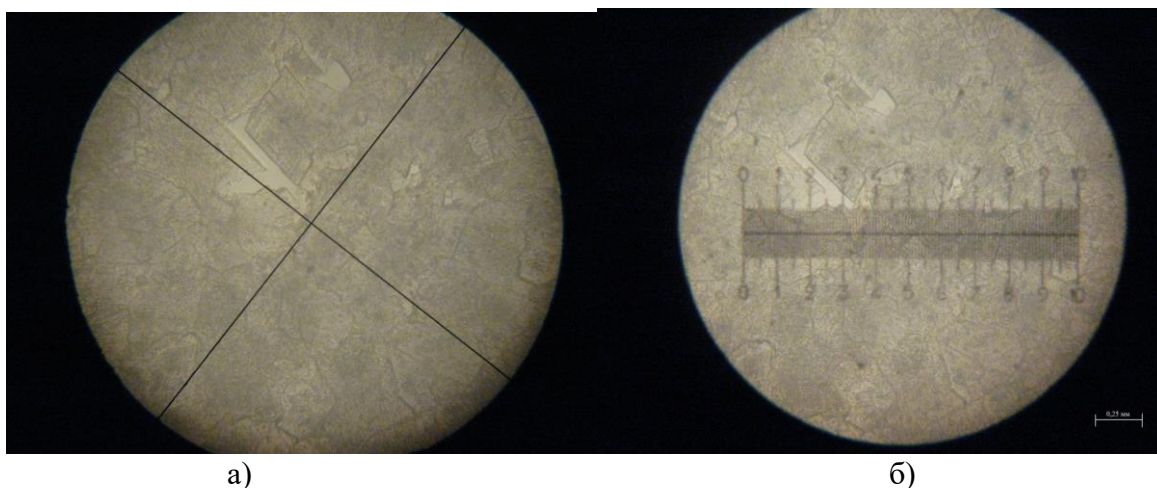


Рис. 1. Невипалений доломіт Єленівського родовища: а) ($\times 100$); б) ($\times 48$)

Відомо, що розкладання доломіту при випалі відбувається у дві стадії: на першій стадії (720 – 870 °С) доломіт розкладається на карбонати кальцію та магнію, причому $MgCO_3$ одразу дисоціює на MgO та CO_2 ; на другому етапі (870-1000 °С) відбувається дисоціація $CaCO_3$. Випал каустичного доломіту для отримання магнезійного в'язучого здійснюється при температурі 650-750 °С з метою запобігання утворенню вільного оксиду кальцію, який при взаємодії з замішувачем (розчином хлориду або сульфату магнію) утворює хлориди або сульфати кальцію і таким чином значно знижує міцність затверділого в'язучого.

З метою оптимізації температури напіввипалу доломіту були проведені рентгенографічні аналізи доломіту, випаленого при різних температурах.

Згідно з дифрактограмою доломіту, випаленого при 800-820 °С впродовж двох годин (рис. 2), спостерігаються дифракційні максимуми, що відповідають MgO ($d \cdot 10^{-10}_M = 1,49; 2,106; 2,436$), CaO ($d \cdot 10^{-10}_M = 2,407; 2,779$), а також наявні піки $Ca(OH)_2$ ($d \cdot 10^{-10}_M = 1,795; 1,93; 2,628; 4,92$), який утворюється внаслідок часткової гідратації високоактивного каустичного доломіту.

Згідно з методикою [4] визначалася активність каустичного доломіту, випаленого при температурі 800-820 °С. При взаємодії доломіту з водою спостерігалась бурхлива реакція, яка супроводжувалась значним виділенням тепла, і, як наслідок, активним випаровуванням води. Виявлено, що

початок гасіння спостерігався при 60 °С, а кінець – при 55 °С. Згідно з цими даними вважаємо, що випалений каустичний доломіт є швидкогасячим та низькоекзотермічним. Втрати при прожарюванні (ВПП) складають 40 мас. %.

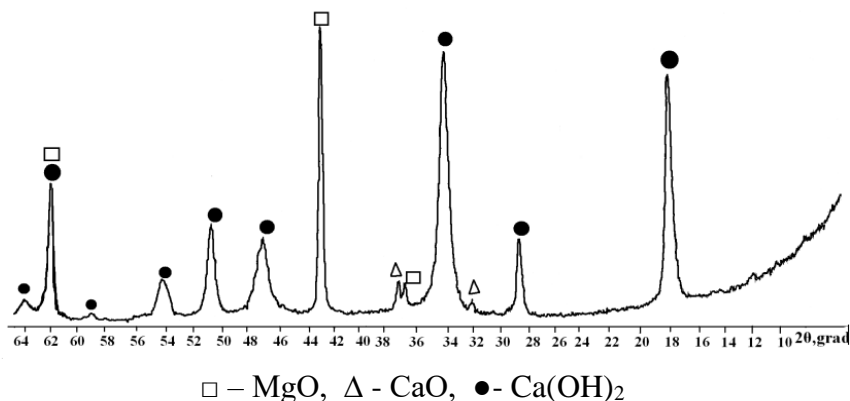


Рис. 2. Дифрактограма доломіту, випаленого при 800-820 °С

Досліджуючи дифрактограму доломіту, випаленого при температурі 750-770 °С впродовж двох годин (рис. 3), виявлено дифракційні максимуми, що відповідають MgO ($d \cdot 10^{-10} \text{ м} = 2,104$), CaCO_3 ($d \cdot 10^{-10} \text{ м} = 1,873; 1,912; 2,088; 2,277; 2,487; 2,842;$

$3,03; 3,839$), а також наявний пік залишкового доломіту $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ($d \cdot 10^{-10} \text{ м} = 2,892$). Дифракційні максимуми, що відповідають CaO, відсутні, а кількість ВПП складала 20,24 мас. %.

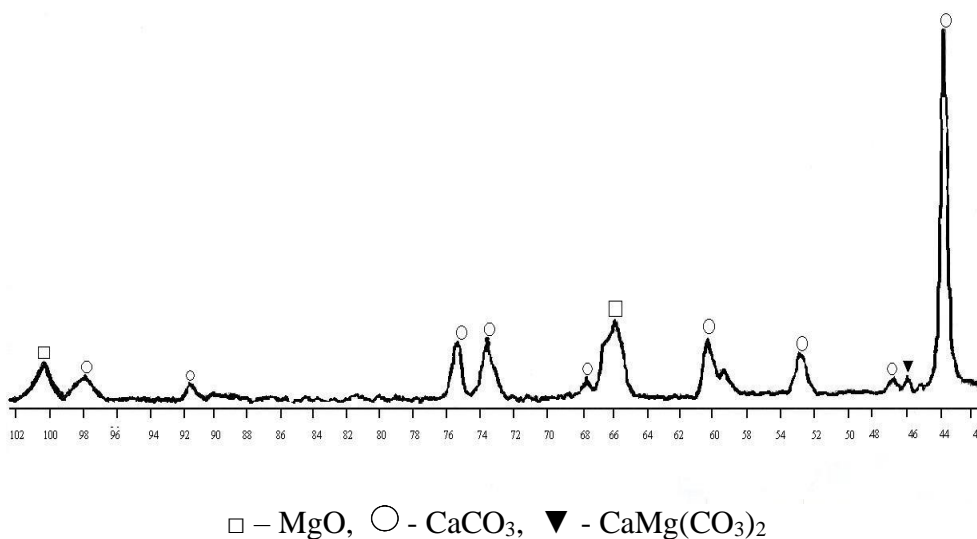


Рис. 3. Дифрактограма доломіту, випаленого при 750-770 °С

На дифрактограмі доломіту, випаленого при температурі 700-730 °С впродовж двох годин (рис. 4), виявлено дифракційні максимуми, що відповідають

MgO ($d \cdot 10^{-10} \text{ м} = 2,107$); CaCO₃ ($d \cdot 10^{-10} \text{ м} = 1,872$; 1,91; 2,089; 2,276; 2,276; 2,848; 3,843) та доломіту CaMg(CO₃)₂ ($d \cdot 10^{-10} \text{ м} = 2,192$; 2,404; 2,664; 2,885).

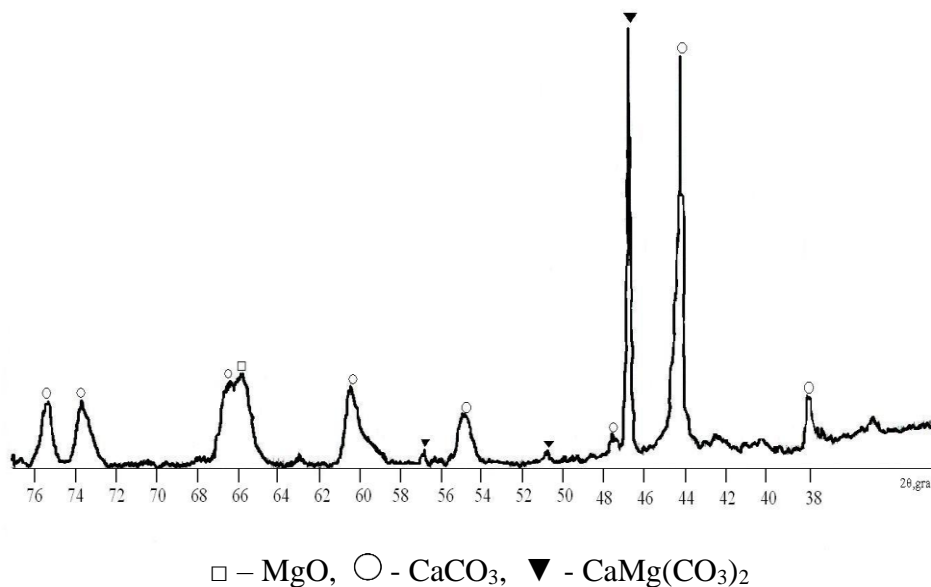


Рис. 4. Дифрактограма доломіту, випаленого при 700-730 °С

При даній температурі випалу доломіту дифракційні максимуми, що відповідають CaO, також відсутні, а ВПП – 18,3 мас. %, але спостерігається більше піків залишкового доломіту, тому стає зрозуміло, що пониження температури далі не має сенсу, оскільки буде утворюватися більше нерозкладеного доломіту.

З каустичного доломіту, випаленого при різних температурах, були виготовлені зразки, згідно з малою методикою Стрелкова, з використанням різних замішувачей. Як замішувачі використовували MgSO₄ та розчин природного мінералу бішофіту ($\rho = 1,20 \text{ г/см}^3$). Зразки зберігались на повітрі та піддавалися випробуванню у різні терміни твердіння.

Як свідчать отримані результати, температура випалу каустичного доломіту суттєво впливає на фізико-механічні властивості зразків. Визначено, що оптимальною температурою випалу є 700-

730 °С. Зразки після 28 діб тверднення характеризуються високою міцністю при стисканні: для бішофіту вона досягала 35-65 МПа, а для MgSO₄ – 20-40 МПа (в залежності від терміну твердіння). Таким чином, більш ефективним замішувачем для каустичного доломіту є бішофіт.

Зразки каустичного доломіту випаленого при 800-820 °С, при замішуванні нагрівалися і характеризувалися дуже великою водопотребою в межах 1,404-1,64, що суттєво впливало на кінцеву міцність зразків. На наш погляд, це пояснюється наявністю значної кількості CaO, який утворюється в каустичному доломіті, випаленому при даній температурі (рис. 2). При замішуванні розчинами солей магнію CaO реагує з ними, утворюючи хлористий або сірчаноокислий кальцій, що негативно відбивається на якості затверділого каустичного доломіту, але в цьому випадку більш ефективним розчинником стає

сульфат магнію, тому зразки на $MgSO_4$ характеризувалися дещо вищою міцністю, аніж на бішофіті.

З метою дослідження впливу концентрації замішувача на характеристики міцності магнезійного в'язучого були виготовлені зразки з використанням бішофіту та сульфату магнію з концентрацією змішувачів $1,20 \text{ г/см}^3$, $1,22 \text{ г/см}^3$ та $1,24 \text{ г/см}^3$. Як свідчать отримані результати, концентрація розчину істотно впливає на міцність в початковий період твердіння – 1–7-ма доба твердіння. Після 28 діб тверднення показники міцності зразків майже не відрізняються.

Оптимальною, на наш погляд, є концентрація замішувача $1,20 \text{ г/см}^3$, оскільки збільшення концентрації розчину більше цього значення не впливає істотно на кінцеву міцність зразків, а чим вища концентрація замішувача, тим вірогідніше поява на виробих тріщин, які супроводжуються виділенням надлишку солей у вигляді нальоту кристалів на поверхні.

Встановлено, що основними продуктами гідратації каустичного доломіту, замішаного розчином бішофіту за повітряних умов тверднення, є пентаоксигідрохлорид магнію $5MgO \cdot MgCl_2 \cdot 13H_2O$ та гідроксид магнію. Саме пентаоксигідрохлорид магнію є головною і найбільш стабільною складовою магнезійного каменя, замішаного хлоридом магнію, що забезпечує його міцність та стійкість до розтріскування [5].

Була розроблена ксилолітова суміш, яка складалася з каустичного доломіту, тирси, кварцового піску у співвідношенні за об'ємом 1,7 : 1,4 : 1,6. Кварцовий пісок підвищує міцність та стійкість матеріалу до стирання.

Суха суміш замішувалася розчином бішофіту щільністю $1,2 \text{ г/см}^3$ або $MgSO_4$ щільністю $1,2 \text{ г/см}^3$. Зразки-кубики розміром $2 \times 2 \times 2 \text{ см}$ пресувалися під тиском 30 МПа. Зразки зберігалися у повітряних умовах і піддавалися випробуванням у різні терміни твердіння. В табл. 1 наведено результати дослідження міцності отриманих будівельних матеріалів.

Таблиця 1

Результати досліджень границі міцності на стиск ксилоліту

Ксилоліт на основі замішувача	Границя міцності на стиск, МПа, у віці		
	3 доби	7 діб	28 діб
Бішофіт	30	42	50
Сульфат магнію	18	28	30

Як свідчать отримані дані, ксилоліт, замішений на бішофіті, має кращі результати у порівнянні із зразками на сульфаті магнію, його границя міцності на стиск у віці 28 діб складають 50 МПа.

Оскільки ксилоліт зазвичай використовується у промисловому та житловому будівництві для улаштування монолітних покриттів для підлоги, тобто там, де вони піддаються значним навантаженням, то до них висуваються високі вимоги до стирання. Дослідження отриманих зразків ксилоліту на здатність

до стирання здійснювалося згідно з методикою, викладеною в [6]. Результати дослідження наведено в табл. 2.

Отримані результати свідчать про те, що зразки, виготовлені на каустичному доломіті та відходах деревообробки, замішані бішофітом та $MgSO_4$, мають високий коефіцієнт зносу та їх можна віднести до I-го сорту (для мостового клінкеру першого сорту коефіцієнт повинен бути не менше 18, а для третього сорту – не менше 14).

Результати випробування ксилоліту на здатність до стирання

Найменування матеріалу	Втрата ваги, г, після кожних 110 обертів круга				Повне стирання, г	Коефіцієнт зносу (стійкості до стирання)
	110	220	330	440		
Ксилоліт на бішофіті	262,5	262	261,4	261	2	19,4
Ксилоліт на сульфаті магнію	261,2	260,4	259	258	5	18,4

Таким чином, розроблено магнезіальні в'язучі на основі каустичного доломіту та природного бішофіту, що є основою для створення нових складів будівельних матеріалів, а саме ксилоліту, при отриманні якого використовують відходи обробки деревини. Застосування природного бішофіту та тирси хвойних порід дерев дозволяє суттєво знизити

собівартість будівельних матеріалів. Розроблений матеріал характеризується високою міцністю та стійкістю до стирання і може застосовуватися для влаштування безшовних покриттів для підлоги в житлових, громадських і виробничих приміщеннях, для заливання підлоги в залізничних вагонах, у приміщеннях з інтенсивним рухом.

Список літератури

1. Тараненкова, В.В. Перспективы получения магнезиальных вяжущих на основе минеральных ресурсов Украины [Текст] / В.В. Тараненкова, Г.Н. Шабанова, А.Л. Смаль, Е.Д. Кузьменков // Новейшие достижения в области импортозамещения в химической промышленности и производстве строительных материалов: междунар. науч.-техн. конф., 22-23 ноября 2012 г.: сб. матер. в 2 ч. – Минск : БГТУ, 2012. – Ч. 1. – С. 31-34.
2. Термический анализ минералов и горных пород [Текст] / В.П. Иванова, Б.К. Касатов, Т.Н. Красавина, Е.Л. Розина. – Л.: Недра, 1974. – 399 с.
3. Куколев, Г.В. Рациональная технологическая классификация металлургических доломитов [Текст] / Г.В. Куколев, Л.П. Папкина, К.Н. Репенко. – Сталь, 1949. – № 2. – С. 5-7.
4. Толстой, В.Ф. Методические указания к лабораторной работе “Физико-механические испытания воздушной извести” по курсу “Общая технология силикатов” [Текст] / В.Ф. Толстой, В.С. Нитченко. – Харьков: ХПИ, 1991. – 8 с.
5. Шабанова, Г.М. Дослідження продуктів гідратації магнезіального в'язучого на основі каустичного доломіту [Текст] / Г.М. Шабанова, В.В. Тараненкова, Г.Л. Смаль, Є.Д. Кузьменков // Вісник НТУ «ХП». – Харків: НТУ «ХП». – 2012. – № 32. – С. 184-188
6. Бутт, Ю.М. Практикум по химической технологии вяжущих материалов [Текст] / Ю.М. Бутт, В.В. Тимашев. – М.: Высшая школа, 1973. – 495 с.

Ключові слова: каустичний доломіт, бішофіт, деревинна тирса, ксилоліт, міцність, стійкість до стирання.

Анотації

Розроблено ксилолітові матеріали на основі вітчизняної сировини – каустичного доломіту, кварцового піску, деревинної тирси та розчину природного мінералу бішофіту. Одержані матеріали характеризуються високою міцністю та стійкістю до стирання.

Разработаны ксилолитовые материалы на основе отечественного сырья – каустического доломита, кварцевого песка, древесных опилок и раствора природного минерала бишофита. Полученные материалы характеризуются высокой прочностью и стойкостью к истиранию.

Xylolite materials on the base of domestic raw – caustic dolomite, quartz sand, wood sawdust and natural mineral bischofite solution – are developed. Materials obtained characterized with high strength and abrasion resistance.

УДК 666.974:666.973.2

Д-р техн. наук А.Н. Ефремов

A.N. Yefremov

АЛЮМОСИЛИКАТНЫЕ ВЯЖУЩИЕ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНАТА НАТРИЯ

ALUMINOSILICATE BINDERS ON THE BASIS OF ALUMINATE OF SODIUM

Исследованиям щелочных вяжущих системы $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ в последние годы уделяется пристальное внимание как у нас в стране, так и за рубежом. Их структурообразующим соединением являются гидроалюмосиликаты типа $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot(2-4)\text{SiO}_2\cdot n\text{H}_2\text{O}$. В качестве основных компонентов вяжущих Глуховским В.Д. впервые предложены каолин и огнеупорные глины, предварительно обожженные до температуры $800-1000^\circ\text{C}$ [1]. На их основе при затворении растворами едких щелочей и метасиликата натрия можно получить щелочные вяжущие активностью 10-80 МПа [1]. Позже в ряде работ отечественных и зарубежных ученых щелочные вяжущие на основе термоактивированного каолина, основой которых является метакаолинит, стали называть геополимерами (геополимерными цементами), а термоактивированный каолин – метакаолином [2, 3].

С точки зрения применения при высоких температурах такие вяжущие характеризуются рядом недостатков:

продукты дегидратации гидроалюмосиликатов имеют низкую огнеупорность и высокую усадку, особенно огневую [2], вследствие летучести щелочного оксида – нестабильны в условиях восстановительной среды и др. Кроме того, в составе перечисленных алюмосиликатных компонентов и низкомолекулярных силикатов натрия в состав вяжущих вводится значительное количество кремнезема, который снижает температуру плавления многих огнеупорных систем.

Синтез щелочных гидроалюмосиликатов возможен при замене гидроксида и низкомолекулярных силикатов натрия алюминатом натрия. На возможность получения щелочных связок синтезом щелочных гидроалюмосиликатов из смесей концентрированных растворов алюминатов впервые указал Глуховский В.Д. [1]. Будников П.П. и Петровых И.М. [4] синтезировали кристаллический цеолит типа $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2\cdot n\text{H}_2\text{O}$, используя в качестве исходных компонентов алюминат натрия со щелочным модулем

$[\text{Na}_2\text{O}]/[\text{Al}_2\text{O}_3]=1,8$ и жидкое стекло с силикатным модулем $[\text{SiO}_2]/[\text{Na}_2\text{O}]=3,1$. В работе [5] показано, что алюминат натрия состава (1,1 – 1,5) $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ является активным инициатором гидратации высококремнеземистого алюмосиликатного стекла – перлита. При этом получены водостойкие вяжущие автоклавного твердения активностью 11-71 МПа, структурообразующими соединениями которых являются низкоосновные цеолиты типа анальцима – $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 4\text{SiO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и натролита – $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{SiO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Известно [6], что в результате спекания каолинистых глин в шамот при температуре выше 1350°C значительное количество избыточного кремнезема и плавней после кристаллизации муллита переходят в расплав, который после охлаждения образует 40-60% кремнеземистого стекла. Поэтому можно предположить, что при затворении шамотного порошка водным раствором алюмината натрия будет происходить растворение кремнеземистого стекла шамота и синтез щелочных гидроалюмосиликатов.

Замена силиката алюминатом натрия позволит увеличить огнеупорность вяжущего за счет того, что щелочной компонент не будет сокращать содержание Al_2O_3 . К тому же, в отличие от жидкостекольных вяжущих, где тонкомолотый шамот и шамотные заполнители остаются практически инертными по отношению к жидкому стеклу, в композициях с алюминатом натрия они будут играть активную структурообразующую роль, что повысит адгезию и сбалансирует работу связки и заполнителей.

Кроме того, обязательным компонентом большинства огнеупорных алюмосиликатных бетонов с низким и особонизким содержанием высокоглиноземистого цемента является ультрадисперсный аморфный кремнезем, конденсирующийся при выплавке

ферросплавов. Высокая пуццолановая активность аморфного микрокремнезема в высокопрочных общестроительных бетонах доказана работами Батракова В.Г., Каприелова С.С., Шейнфельда А.В. [7]. Аморфный микрокремнезем должен проявлять еще более высокую активность по отношению к алюминату натрия, чем аморфный кремнезем тонкомолотого шамота. Это может обеспечить синтез щелочных гидроалюмосиликатов при более низких температурах.

В работе [8] нами показано, что применение огнеупорных и высокоогнеупорных наполнителей способствует получению при температурах выше 600°C керамической кристаллической связки из огнеупорных фаз – муллита, корунда, алюмината натрия и β -глинозема. Поэтому целью настоящей работы являлась разработка композиций огнеупорных вяжущих на основе раствора алюмината натрия, дисперсных шамота и аморфного микрокремнезема, активных по отношению к алюминату натрия, и высокоогнеупорных муллитокорундовых и корундовых наполнителей, образующих при высоких температурах огнеупорную вяжущую матрицу бетонов.

Свойства камня вяжущих исследовались на образцах кубов с ребром 2 см, изготовленных из смесей нормальной густоты. В качестве исходных материалов использовались порошки (остаток на сите 008 5-10%) шамота, муллитокорунда и корунда с содержанием глинозема соответственно 28,76-42,20, 92,2 и 96,8%.

Из технологии глинозема, по методу Байера, известно [9], что при минимальном содержании Na_2O алюминатные растворы при атмосферном давлении характеризуются низкой стойкостью и из них в осадок может выпадать $\text{Al}(\text{OH})_3$ в виде гидроаргиллита. При обычной температуре удовлетворительную стойкость имеют растворы со щелочным модулем 1,4-2 и плотностью 1,4-1,5 г/см³. Поэтому в исследованиях использовались

растворы алюминатов натрия плотностью 1,45 г/см³. Условно разбавление растворов до более низкой плотности производилось введением расчетного количества воды непосредственно при затворении смесей.

Растворимость аморфного кремнезема определяется также температурой и показателем pH жидкой фазы [10]. Поэтому можно полагать, что основными факторами, определяющими синтез щелочных гидроалюмосиликатов в результате взаимодействия кремнеземистого стекла шамота и

алюмината натрия, будут щелочной модуль и плотность раствора последнего, а также температура тепловлажностного твердения. Для оптимизации указанных характеристик раствора алюмината натрия по прочности пропаренных (Y₁) и автоклавированных (Y₂) образцов был использован двухфакторный план эксперимента на трехчисленных уровнях (-1; 0; +1). В табл. 1 и 2 представлены значения варьируемых факторов и результаты эксперимента.

Таблица 1

Значения факторов варьирования

Код фактора	Физический смысл фактора	Единица измерения	Интервал варьирования	Уровни фактора		
				-1	0	+1
X ₁	Щелочной модуль алюмината натрия	-	0,3	1,4	1,7	2,0
X ₂	Плотность раствора алюмината натрия	г/см ³	0,1	1,2	1,3	1,4

Таблица 2

Матрица планирования и результаты эксперимента

№ опыта	Значение факторов				Значение параметров оптимизации	
	кодированные		натуральные		\bar{Y}_1 , МПа	\bar{Y}_2 , МПа
	x ₁	x ₂	X ₁	X ₂		
1	2	3	4	5	6	7
1	-1	-1	1,4	1,2	1,8	7,6
2	-1	0	1,4	1,3	9,5	39,7
3	-1	1	1,4	1,4	14,2	54,3
4	0	-1	1,7	1,2	2,8	17,0
5	0	0	1,7	1,3	15,0	68,6
6	0	1	1,7	1,4	26,5	85,0
7	1	-1	2,0	1,2	5,6	19,6
1	2	3	4	5	6	7
8	1	0	2,0	1,3	21,4	73,8
9	1	1	2,0	1,4	29,8	91,5

В результате статистической обработки данных эксперимента в соответствии с принципами математического планирования и статистической обработки [11] получены

математические модели зависимости активности шамотных вяжущих от щелочного модуля и плотности раствора алюмината натрия в виде следующих полиномов второй степени:

$$Y_1 = 16,04 + 5,15 \cdot X_1 + 9,98 \cdot X_2 + 2,85 \cdot X_1 \cdot X_2 - 1,12 \cdot X_1^2 - 1,92 \cdot X_2^2;$$

$$Y_2 = 66,78 + 13,88 \cdot X_1 + 31,1 \cdot X_2 + 6,3 \cdot X_1 \cdot X_2 - 9,12 \cdot X_1^2 - 14,87 \cdot X_2^2.$$

Информационная способность моделей проверена по критерию Фишера. Коэффициент множественной корреляции составил 0,97 и 0,96.

На рис. 1 представлены зависимости изолиний предела прочности вяжущих при сжатии от характеристик раствора алюмината натрия. Согласно этим данным при принятой температуре тепловлажностной обработки активность

вяжущих возрастает с увеличением щелочного модуля и плотности раствора алюмината натрия. Однако при переработке бокситов в промышленных условиях получают алюминаты натрия со щелочным модулем 1,7-1,8. Стойкость растворов с более низким щелочным модулем при всех концентрациях и температурах резко снижается [9].

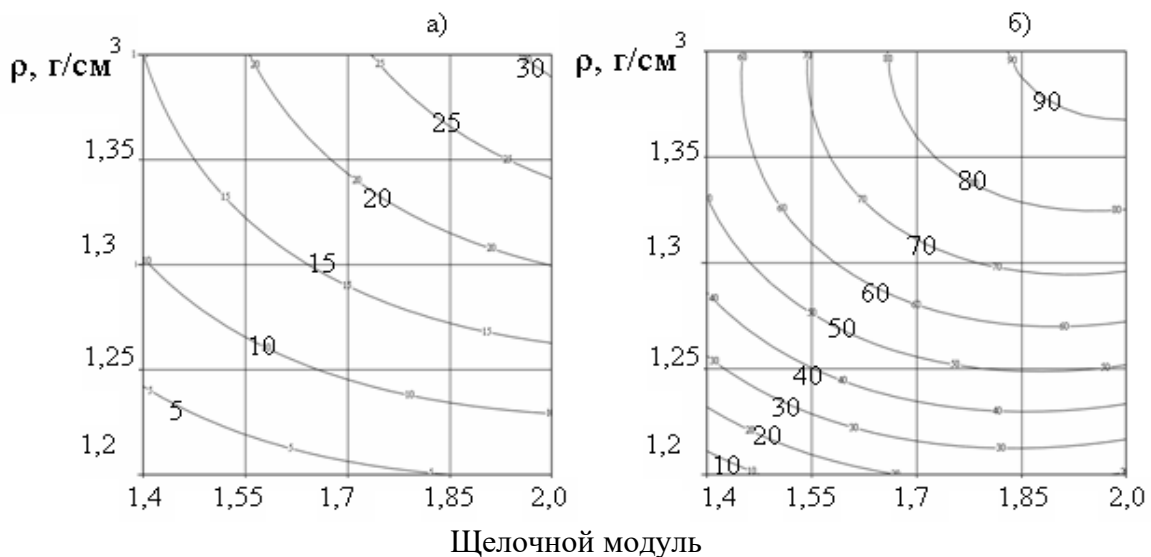


Рис. 1. Зависимость предела прочности при сжатии, МПа, камня шамотного вяжущего после пропаривания (а) и автоклавирования (б) от параметров раствора алюмината натрия

Кроме того, при модуле ниже 1,5 и плотности менее 1,2 г/см³ вяжущие композиции склонны к вспучиванию. Учитывая это и преследуя цель минимального введения Na₂O, можно сделать вывод о том, что оптимальными характеристиками раствора алюмината натрия являются: щелочной модуль 1,7-1,8 и плотность 1,20-1,25 г/см³ для автоклавных вяжущих и 1,30-1,35 г/см³ – для неавтоклавных.

В нормальных условиях тонкомолотый шамот, затворенный раствором алюмината натрия, не твердеет, что объясняется, вероятно, низкой растворимостью кремнеземистого стекла при обычной температуре [10]. Поэтому в дальнейшем вяжущие на основе шамота, твердеющие при низких температурах, не исследовались.

Известно [10], что растворимость кремнезема в высокощелочной среде, особенно аморфного, резко возрастает при

температуре выше 150°C. Вследствие этого в композициях на основе тонкомолотого шамота и алюмината натрия температура тепловлажностного твердения оказывает решающее влияние и на кинетику синтеза щелочных гидроалюмосиликатов. Свидетельством этого являются исследования влияния температуры и длительности тепловлажностной обработки

на активность вяжущей композиции из шамота, затворенного раствором алюмината натрия со щелочным модулем 1,73 и плотностью 1,30 г/см³. Результаты этих исследований приведены в табл. 3. Их анализ показывает, что увеличение температуры пропаривания с 90 до 99°C ведет к незначительному повышению активности вяжущего.

Таблица 3

Влияние температуры и длительности тепловлажностного твердения на активность шамотного вяжущего

Температура, °C	Предел прочности при сжатии, МПа, при длительности изотермической выдержки в часах			
	2	5	8	24
90	14,5	17,7	18,0	19,5
99	19,0	21,5	22,5	24,8
150	50,8	56,9	63,0	59,5
173	64,5	67,0	70,5	42,0
193	77,0	79,2	55,6	35,0

По сравнению с образцами, пропаренными при 90°C, подъем температуры автоклавной обработки до 150°C при 8-часовой изотермической выдержке увеличивает прочность затвердевшего вяжущего в 3,5 раза. Дальнейшее повышение температуры автоклавирования хотя и вызывает рост прочности камня вяжущего, но он не такой значительный.

Характерной особенностью тепловлажностного твердения алюминатного шамотного вяжущего является то, что при пропаривании в течение 24 часов изотермического прогрева наблюдается непрерывный рост прочности образцов. При автоклавировании же изменение прочности во времени носит экстремальный характер – после достижения максимума при определенной длительности изотермической выдержки, в дальнейшем происходит сброс прочности. Повышение температуры запаривания сокращает время достижения этого

максимума и увеличивает относительное падение прочности. Так, если при температуре 150 и 173°C максимум прочности камня вяжущего приходится на 8-часовой период изотермического прогрева, то при температуре 193°C – на 5-часовой. В первом случае сброс прочности происходит после суточного прогрева, во втором – уже через 8 часов. После 24 часов изотермической выдержки при температуре 150, 173 и 193°C снижение прочности по отношению к максимально достигнутой составляет 5,5, 40,4 и 55,8% соответственно.

Единственным способом повышения огневых свойств шамотного щелочноалюминатного вяжущего является увеличение содержания глинозема за счет введения добавок высокоглиноземистых материалов. Лучшей из использованных высокоглиноземистых добавок является хорошо спеченный муллитокорундовый шамот (или корунд), имеющий низкую водопотребность. Результаты исследования

влияния его количества на активность вяжущего приведены на рис. 2. Они показывают, что введение до 80 % тонкомолотого муллитокорундового шамота снижает активность вяжущего незначительно. Так, прочность образцов композиции, состоящей из 20 % Новоселицкого и 80 % муллитокорундового шамотов, после пропаривания и автоклавирования остается на уровне соответственно 64 и 78 % прочности образцов, изготовленных с использованием только Новоселицкого шамота.

Вследствие недостатка растворенного кремнезема в жидкой фазе твердение смесей, состоящих из 100 % муллитокорундового шамота, в нормальных условиях не происходит, а при пропаривании эта композиция, затворенная раствором алюмината натрия, вспучивается.

Высокая дисперсность существенно ускоряет процессы растворения микрокремнезема в растворе алюмината натрия и синтез гидроалюмосиликатов уже при нормальной температуре. Свидетельством этого являются результаты исследований, приведенные в табл. 4 и 5. Их анализ показывает, что независимо от содержания глинозема в тонкомолотом алюмосиликатном наполнителе добавление к нему от 5 до 40 % аморфного микрокремнезема вызывает непрерывный рост прочностных показателей камня вяжущих после твердения в нормальных условиях, при пропаривании и последующей сушке. Однако активность вяжущих нормального твердения остается невысокой, 5,2-25,7 МПа, возрастая до 17,9-63,8 после пропаривания.

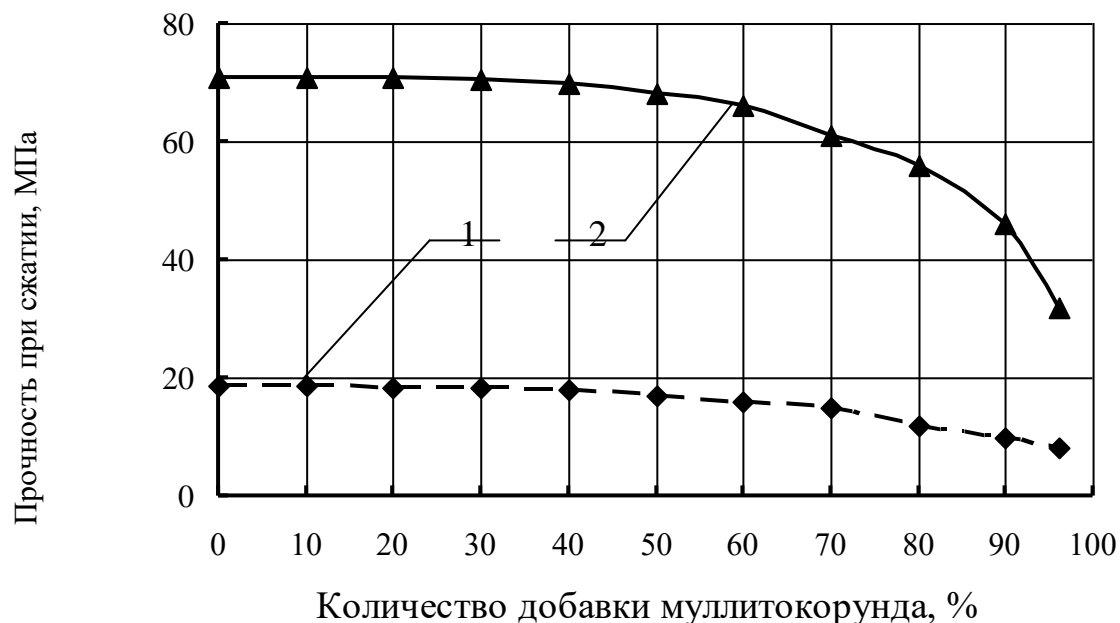


Рис. 2. Влияние условий твердения и количества добавки тонкомолотого муллитокорунда на активность шамотного вяжущего на алюминате натрия:

- 1 – пропаривание;
- 2 – автоклавирование

Таблица 4

Влияние содержания микрокремнезема и вида наполнителей на прочность (Rсж.) камня вяжущего на растворе алюмината натрия плотностью 1,30 г/см³ после 28 суток нормального твердения (числитель) и последующей сушки (знаменатель)

Вид наполнителя	Rсж., МПа, при содержании микрокремнезема, % массы							
	0	5	10	20	40	60	80	100
Шамот	0	-	<u>5,2</u> 26,2	<u>12,3</u> 52,1	<u>18,3</u> 59,5	<u>17,4</u> 58,2	<u>15,0</u> 48,5	<u>10,0</u> 43,1
Муллито-корунд	0	<u>6,6</u> 26,5	<u>12,2</u> 36,5	<u>19,6</u> 54,8	<u>23,2</u> 69,6	-	-	-
Корунд	0	<u>11,0</u> 32,8	<u>17,7</u> 77,2	<u>23,6</u> 89,8	<u>25,7</u> 90,5	-	-	-

Таблица 5

Влияние содержания микрокремнезема и вида наполнителей на прочность (Rсж.) камня вяжущего на растворе алюмината натрия плотностью 1,30 г/см³, после пропаривания (числитель) и последующей сушки (знаменатель)

Вид наполнителя	Rсж., МПа, при содержании микрокремнезема, % массы							
	0	5	10	20	40	60	80	100
Шамот	0	-	<u>17,9</u> 30,5	<u>27,8</u> 54,2	<u>36,2</u> 61,5	<u>38,5</u> 60,4	<u>35,7</u> 50,3	<u>29,5</u> 45,4
Муллитокорунд	0	<u>16,4</u> 30,0	<u>24,7</u> 40,2	<u>38,0</u> 58,7	<u>56,8</u> 74,3	-	-	-
Корунд	0	<u>22,2</u> 26,1	<u>34,0</u> 49,7	<u>45,1</u> 67,4	<u>63,8</u> 77,5	-	-	-

Последующая сушка несколько выравнивает показатели прочности камня вяжущих: после нормального твердения и сушки прочность образцов увеличивается до 26,2-76,5 МПа, после пропаривания и сушки – до 30,5-77,5 МПа. Дальнейшее увеличение расхода аморфного микрокремнезема сопровождается снижением прочности. При сушке камень вяжущих дает большую усадку и без наполнителей растрескивается.

Исследовано влияние плотности раствора алюмината натрия на прочностные показатели камня вяжущего состава "аморфный микрокремнезем + наполнитель = 20 + 80" (табл. 6). Установлено, что увеличение плотности раствора алюмината натрия с 1,20 до 1,35 г/см³ вызывает практически прямо пропорциональный

рост прочности образцов после пропаривания. Причем с увеличением истинной плотности наполнителей, т.е. при относительном увеличении содержания микрокремнезема по объему в смеси с наполнителем, прочность камня вяжущих при переходе от шамота к муллитокорунду и корунду заметно возрастает. Дальнейшее повышение концентрации раствора ведет к снижению активности вяжущих.

Вяжущие на основе аморфного микрокремнезема способны к длительному твердению в нормальных условиях. В ранние сроки вяжущие с повышенным содержанием микрокремнезема характеризуются более высокой относительной скоростью твердения. Так, при использовании муллитокорундового и корундового наполнителей после 7 суток

Будівельні матеріали, конструкції та споруди

нормального твердения относительная к 28-дневной прочность камня вяжущего с 20 и 10 % микрокремнезема составила

соответственно 73-75 и 69-71 %, а после 360 суток 143-144 и 152-156 % (табл. 7).

Таблица 6

Влияние плотности раствора алюмината натрия на прочность при сжатии (Рсж.) камня вяжущего "микрокремнезем + наполнитель = 20+80" после пропаривания (числитель) и последующей сушки (знаменатель)

Вид наполнителя	Рсж., МПа, при плотности раствора алюмината натрия, г/см ³				
	1,20	1,25	1,30	1,35	1,40
Шамот	<u>12,2</u> 22,4	<u>19,0</u> 32,3	<u>27,4</u> 38,5	<u>32,6</u> 44,1	<u>24,8</u> 48,4
Муллито-корунд	<u>16,5</u> 38,1	<u>25,3</u> 45,6	<u>34,7</u> 52,0	<u>38,6</u> 55,4	<u>32,4</u> 62,4
Корунд	<u>23,5</u> 46,8	<u>35,6</u> 55,4	<u>42,6</u> 65,5	<u>49,7</u> 68,6	<u>45,5</u> 75,0

Таблица 7

Влияние содержания алюмосиликатных наполнителей на сроки схватывания и кинетику роста прочности камня вяжущих (Рсж.) нормального твердения на основе алюмината натрия (МПа – числитель, % – знаменатель)

№ пп	Состав порошковой части вяжущих, % массы				Сроки схватывания, час мин		Рсж. при длительности твердения, сут		
	шамот	муллито-корунд	корунд	микрокремнезем	начало	конец	7	28	360
1	80	-	-	20	5-30	6-30	<u>9,2</u> 68	<u>13,6</u> 100	<u>19,2</u> 141
2	-	80	-	20	5-00	6-15	<u>18,8</u> 73	<u>25,7</u> 100	<u>36,7</u> 143
3	-	90	-	10	7-15	8-45	<u>10,8</u> 69	<u>15,7</u> 100	<u>23,9</u> 152
4	-	-	80	20	4-15	5-30	<u>22,3</u> 75	<u>29,7</u> 100	<u>42,8</u> 144
5	-	-	90	10	6-30	8-00	<u>12,3</u> 71	<u>17,4</u> 100	<u>27,1</u> 156

Замена обычного шамотного наполнителя с плотностью 2,62 г/см³ более тяжелыми муллито-корундом и корундом ведет к снижению нормальной густоты теста вяжущего с 20 % микрокремнезема почти вдвое: с 24,2 % при использовании шамотного наполнителя до 14,8 и 12,6 %

при применении соответственно муллито-корунда и корунда. Расчеты показывают, что при этом в композиции с алюминатом натрия вводится соответственно 4,04; 2,47 и 2,1 % Na₂O, что позволяет прогнозировать незначительное влияние этого плавня на огневые свойства

бетонов, особливо с високоглиноземистими заповнювачами.

Выводы

1. Оптимизированы составы алюмосиликатных вяжущих на основе композиций

"1,7Na₂O·Al₂O₃+отвердитель+муллитокорундовый либо корундовый наполнитель". Показано, что при пропаривании и автоклавной обработке в качестве отвердителя раствора алюмината натрия можно применять рядовой шамот, в условиях нормального твердения – аморфный микрокремнезем.

2. Исследовано влияние параметров раствора алюмината натрия, соотношений отверждающих компонентов и наполнителей, условий и длительности твердения на нормальную плотность, сроки схватывания и активность вяжущих. На этой основе предложены вяжущие с пределом прочности при сжатии после нормального твердения, пропаривания или автоклавирования в пределах 12,2-79,2 МПа, а после последующей сушки – 22,4-103 МПа.

Список литературы

1. Шлакощелочные бетоны на мелкозернистых заполнителях [Текст] / под ред. В.Д. Глуховского. – К.: Вища шк., 1981. – 224 с.
2. Krivenko, P. Hydration-Dehydration Structure Formation Processes in Geocements / P. Krivenko, G. Kovalchuk // Proceed Intern. Workshop Geopolymers Binder. – Weimar: 2006. – P. 73-92.
3. Davidovits, J. Geopolymers - inorganic polymeric new materials // Journal of Thermal Analysis. – 1991. – № 37(8). – P. 1633-1656.
4. Будников, П.П. Влияние некоторых факторов на кристаллизацию синтетического цеолита типа «А» [Текст] / П.П. Будников, И.М. Петровых // Журнал прикладной химии. – 1965. – Т. 38. – № 1. – С. 10-17.
5. Макеева, Н.С. Свойства автоклавных строительных материалов на основе вулканических стекол [Текст] / Н.С. Макеева, Ю.П. Горлов, М.И. Зейфман // Строительные материалы. – 1985. – № 1. – С. 24-25.
6. Стрелов, К.К. Теоретические основы технологии огнеупорных материалов [Текст] / К.К. Стрелов, И.Д. Кащеев. – М.: Металлургия, 1996. – 602 с.
7. Каприелов, С.С. Модифицированные бетоны нового поколения: реальность и перспектива [Текст] / С.С. Каприелов, В.Г. Батраков, А.В. Шейнфельд // Бетон и железобетон. – 1999. – № 6. – С. 6-10.
8. Yefremov A.N. Alkaline binders for refractory concretes on the basis of soluble silicates and aluminates of sodium / A.N. Yefremov // 2007-International conference alkali activated Materials-Research, Production and Utilization. - Praha: Zeithamlova Vilena, Ing., 2007. - 717-724.
9. Лайнер, А.И. Производство глинозема [Текст] / А.И. Лайнер. – М.: Металлургиздат, 1961. – 620 с.
10. Аваков, В.А. Сравнительная растворимость некоторых модификаций кремнезема [Текст] / В.А. Аваков // Строительные материалы. – 1972. – № 11. – С. 35-36.
11. Вознесенский, В.А. Современные методы оптимизации композиционных материалов [Текст] / В.А. Вознесенский, В.Н. Выровой, В.Е. Керш и др. – К.: Будивельник, 1983. – 144 с.

Ключевые слова: алюмосиликатное огнеупорное вяжущее, шамот, муллитокорунд, корунд, микрокремнезем, алюминат натрия, активность вяжущего.

Анотації

Оптимізовані склади алюмосилікатних в'язучих на основі композицій "1,7Na₂O·Al₂O₃ + отвердитель + мулітокорундовий або корундовий наповнювач". Показно, що при пропарюванні і автоклавній обробці як отверджувач розчину алюмінату натрію можна застосовувати рядовий шамот, в умовах нормального твердіння - аморфний мікрокремнезем.

Досліджено вплив параметрів розчину алюмінату натрію, співвідношень отверджуючих компонентів і наповнювачів, умов і тривалості твердіння на нормальну густину, терміни тужавіння і активність в'язучих. На цій основі запропоновані в'язучі з межею міцності при стиску після нормального твердіння, пропарювання або автоклавовання в межах 12,2-79,2 МПа, а після подальшої сушки - 22,4-103 МПа.

Оптимизированы составы алюмосиликатных вяжущих на основе композиций "1,7Na₂O·Al₂O₃+отвердитель+муллитокорундовый либо корундовый наполнитель". Показно, что при пропаривании и автоклавной обработке в качестве отвердителя раствора алюмината натрия можно применять рядовой шамот, в условиях нормального твердения – аморфный микрокремнезем.

Исследовано влияние параметров раствора алюмината натрия, соотношений отверждающих компонентов и наполнителей, условий и длительности твердения на нормальную густоту, сроки схватывания и активность вяжущих. На этой основе предложены вяжущие с пределом прочности при сжатии после нормального твердения, пропаривания или автоклавирования в пределах 12,2-79,2 МПа, а после последующей сушки – 22,4-103 МПа.

Yefremov A.N. Aluminosilicate binders on the basis of aluminate of sodium // Collection scientific works. - Kharkov: Ukrainian state academy of railway transport, 2013. – Vol. 54. - P.

Compositions of aluminosilicate binders "1,7Na₂O·Al₂O₃ + hardener + mullito-corund or corundum filler" are optimized. It was rotined, that at the steaming-out and autoclaving as hardening of aluminate of sodium it is possible to apply ordinary shamotte, in the conditions of normal temperatures is amorphous microsilica.

Influencing of parameters of solution of aluminate of sodium, correlations of hardening components-hardeners and fillers, conditions and terms of hardening on the normal density, terms of grasping and durability of binders is investigational. On this basis offered binders with limit of strength at the compression after normal hardening, steaming-out or autoclaving within of 12,2-79,2 MPa and rough-dry subsequent - 22,4-103 MPa.

УДК 666.965

Доктори техн. наук М.І. Ворожбіян (УкрДАЗТ),
Г.М. Шабанова (НТУ «ХП»),
канд. техн. наук С.О. Кисельова (УкрДАЗТ)

M.I. Vorozhbiyan, G.M. Shabanova, S.O. Kiseleva

**ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВПЛИВУ
КРЕМНЕЗЕМВМІСНОГО ШЛАМУ НА ПРОЦЕСИ
ФАЗОУТВОРЕННЯ В СИСТЕМІ $CaO - SiO_2 - H_2O$**

**FEATURES OF PHASE FORMATION PROCESSES
IN THE SYSTEM OF $CaO - SiO_2 - H_2O$ IN PRESENCE
MICRONIZED SILICA CONTAINING SLAM**

Постановка проблеми. Останніми роками в Україні велику увагу приділяють розробленню технологій, спрямованих на ресурсо- та енергозбереження, що пояснюється обмеженістю та вичерпністю запасів сировини, зростанням цін на енергоносії, високим екологічним навантаженням на навколишнє природне середовище. Актуальною є й проблема утилізації твердих промислових відходів, зберігання яких завдає економічних та екологічних збитків, пов'язаних із забрудненням атмосфери й гідросфери, виведенням з обороту родючих земель та ін.

Широко застосовуваним будівельним матеріалом у галузі будівельної промисловості є силікатна цегла, сировиною для якої є вапно, пісок та вода. Сформовані пресуванням вироби піддають гідротермальній обробці, технологічними параметрами автоклавування є: тиск – від 0,8 до 1,2 МПа, час витримки виробів під тиском – від 8 до 12 год [1]. Один з напрямків модернізації виробництва силікатної цегли пов'язаний зі створенням енергоефективних технологій; шляхом вирішення даної проблеми може стати введення до складу сировинної суміші силікатної цегли відходів промисловості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вивченню процесів фазо- та

структурування в системі $CaO - SiO_2 - H_2O$ присвячені дослідження багатьох авторів [2-5]. Установлено, що при хімічній взаємодії компонентів системи в гідротермальних умовах формуються гідросилікати кальцію, що надають міцності виробам. На кінетику фазо- та структурування впливають природа сировини, стехіометрія компонентів, їх дисперсність, температура та наявність добавок. Установлено, що забезпечити пріоритет та стабільність формування фаз таких низькоосновних гідросилікатів кальцію, як $CSH(B)$ та тоберморит і реалізувати кристалізацію новоутворень з щільною мікроструктурою дозволяє масове співвідношення $CaO:SiO_2 = 1:1$ [6 – 8].

На фазовий склад продуктів реакції значно впливає вид кремнеземного компонента, так, при використанні кремнегелю фази низькоосновних гідросилікатів утворюються на більш ранніх строках [3].

Формуванню щільної мікроструктури силікатного матеріалу сприяє введення у сировинну суміш добавок електролітів. Електроліти змінюють кінетику гасіння вапна, наприклад, при наявності хлорид-іону розчинність $Ca(OH)_2$ зростає, що прискорює його взаємодію з кремнеземом. Крім того, хлориди металів прискорюють

коагуляцію колоїдних новоутворень, що інтенсифікує процеси твердіння.

Постановка завдання. Метою дослідження є встановлення принципової можливості застосування тонкодисперсного відходу – кремнеземвмісного шламу, як компонента в'язучого сировинної суміші для силікатних виробів та встановлення особливостей процесів фазоутворення в системі $CaO - SiO_2 - H_2O$ при наявності кремнеземвмісного шламу.

Виклад основного матеріалу дослідження. У результаті дослідження сухого кремнеземвмісного шламу встановлено, що він має розвинену поверхню, питома площа якої складає 2328,3 м²/кг. Елементний фізико-хімічний аналіз шламу показав, що основними хімічними елементами в його складі є, мас. %: $Na - 5 - 7$, $Al - 1,8$; $Si - 59,3$, $Cl - 7,0$, $Ca - 14,2$, також наявні домішки, мас. %: $Ti - 0,15$, $Cr - 0,007$, $Mn - 0,054$, $Fe - 0,705$, $Ni - 0,072$, $Cu - 0,43$. Хімічним аналізом досліджено оксидний склад шламу, встановлено, що шлам, в основному, містить оксиди, мас. %: $SiO_2 - 66,4$; $CaO - 5,5$; $Al_2O_3 - 1,66$; наявні сліди Na_2O . Виходячи з елементного та оксидного складу кремнеземвмісного шламу можна припустити, що елемент хлор у його складі зв'язаний, в основному, у натрій хлорид, що підтверджує рентгенофазовий аналіз шламу, на рентгенограмі якого ідентифікуються дифракційні максимуми, характерні для $NaCl$ ($d \cdot 10^{-10} = 3,26; 2,825;$

1,995; 1,702; 1,63 м). Також виявлено наявність кристалічної фази $CaCO_3$ (дифракційні максимуми, $d \cdot 10^{-10} = 3,036; 2,494; 2,285; 2,093$ м) та рентгеноаморфної фази, що з великою імовірністю можна ідентифікувати з аморфним SiO_2 , про наявність якої свідчить ділянка характерного гало в інтервалі кутів 2θ від 25° до 47° на рентгенограмі шламу (рис. 1). Наявність фази кальцій карбонату також підтверджена утворенням вуглекислого газу при взаємодії шламу з хлоридною кислотою HCl .

Аналіз результатів комплексу фізико-хімічних досліджень кремнеземвмісного шламу дозволив припустити, що можливе застосування даного промислового відходу як добавки до сировинної суміші при виготовленні силікатних матеріалів. У зв'язку з високою дисперсністю добавки доцільним є її використання як компонента в'язучого на заміну меленого піску.

У дослідженні при виготовленні зразків силікатної цегли були застосовані сировинні матеріали:

- грудкове вапно (ТОВ «завод ЗЗК» корпорації "Харківські будівельні матеріали», Харків), встановлено час гасіння вапна – 11,5 хв та температуру гасіння – $80^\circ C$, що дозволило віднести вапно до високоекзотермічного, із середньою швидкістю гасіння;
- пісок (сmt. Безлюдівка, Харків);
- кремнеземвмісний шлам;
- водопровідна вода.

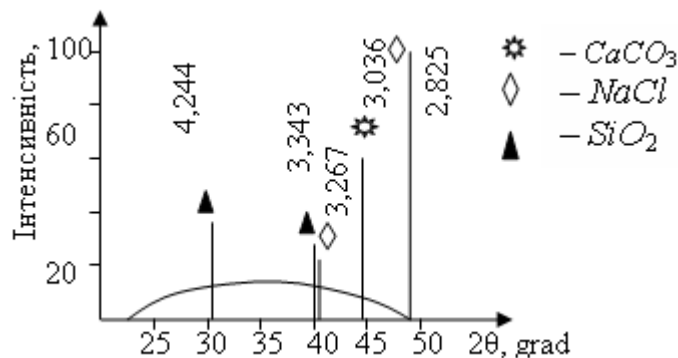


Рис. 1. Штрих-рентгенограма кремнеземвмісного шламу (фрагмент з ділянкою рентгеноаморфного SiO_2)

Для виготовлення в'язучого здійснювався попередній помел вапна у металевому млині до проходу крізь сито 900 отв/см².

Мелене вапно змішували зі шламом так, щоб масове відношення $CaO:SiO_2$ дорівнювало 1:1. З урахуванням того, що вміст SiO_2 в шламі становить біля 66 мас. %, співвідношення $CaO:SiO_2 = 1:1$ реалізується таким складом сировинної суміші, мас. %: в'язуче – 24 (вапно – 10, шлам – 14), пісок – 76.

Помел в'язучого здійснювався до проходу крізь сито № 008, після чого його змішували з піском, зволожували та знов

додатково зволожували після 1 год витримки. Через 4 год витримки методом пресування під тиском (25 МПа) формували зразки-куби з довжиною ребра 0,024 м.

Гідротермальну обробку зразків здійснювали в лабораторному вертикальному автоклаві при технологічних параметрах 0,8 МПа – 8 год та 0,6 МПа – 6 год; готові зразки випробовували на границю міцності при стиску через 14 діб, результати випробувань порівнювали з результатом міцності при стиску зразків, виготовлених із вапняно-піщаної суміші при 0,8 МПа – 8 год (таблиця).

Таблиця

Границя міцності при стиску зразків силікатної цегли з добавками тонкодисперсних промислових відходів

№ п/п	Склад сировинної суміші, мас. %			пісок	Режим обробки			Границя міцності при стиску, МПа
	склад в'язучого		CaO		тиск, МПа	температура, °C	час, год	
	найменування	кількість						
1	10,5	Пісок	10,5	79,0	0,8	175	8	33,0
2	10,0	Шлам	14,0	76,0	0,8	175	8	37,0
3	10,0	Шлам	14,0	76,0	0,6	164	6	27,0

Аналіз результатів значень границі міцності при стиску дозволяє зробити висновок про позитивний вплив кремнеземвмісного шламу на фізико-механічні властивості зразків силікатних виробів. Заміна шламом меленого піску у в'язучому призвела до зростання границі міцності при стиску зразків, виготовлених при загальноприйнятому режимі гідротермальної обробки 0,8 МПа – 8 год, на 12 %, що можна пояснити декількома причинами:

– високою дисперсністю компонентів шламу, що прискорює хімічну взаємодію на поверхні фаз у гетерогенних системах;

– наявністю кремнезему в шламі в аморфній фазі, більш активній порівняно з кристалічним кремнеземом у меленому піску;

– наявністю в складі шламу хлориду натрію, який при розчиненні у воді утворює катіони Na^+ та хлорид-іони. Позитивно заряджені катіони Na^+ сприяють коагуляції негативно заряджених міцел гідросилікатів кальцію, що прискорює процеси їх кристалізації. Величина іонного радіуса Na^+ ($0,95 \cdot 10^{-10}$ м) близька за значенням до іонного радіуса Ca^{2+} ($0,99 \cdot 10^{-10}$ м), тому катіони Na^+ можуть вбудовуватись у кристалічну решітку гідросилікатів кальцію [9]. Стосовно аніонної складової: наявність хлорид-іонів прискорює процес перетворення вапна в гідросилікати кальцію, що пояснюється концентраційною коагуляцією колоїдних часток гідросилікатів, наслідком чого стає ущільнення та зміцнення контактів між ними та поверхнею зерен піску [8, 10].

При зменшенні параметрів гідротермальної обробки до 0,6 МПа – 6 год, міцність при стиску зразків силікатної цегли зменшилась на 18 %, порівняно з міцністю при стиску зразків із вапняно-піщаної суміші, виготовлених при 0,8 МПа – 8 год, але величина границі міцності при стиску (27 МПа) свідчить про те, що за енергозберігаючим режимом гідротермальної обробки можливо отримати силікатну цеглу марок 200 – 250 за ДСТУ Б В.2.7.80-98.

Фазовий склад зразків силікатної цегли на основі кремнеземвмісного шламу, виготовлених при різних параметрах гідротермальної обробки, досліджувався рентгенофазовим методом на дифрактомірі ДРОН-3М з використанням трубки з антикатодом із хрому з ванадієвим фільтром. З метою підвищення інформативності ділянки рентгенограм в області дифракційних відбитків, характерних для гідросилікатів кальцію, отримували додатково, без застосування ванадієвого фільтра, результати досліджень подані на рис. 2, 3.

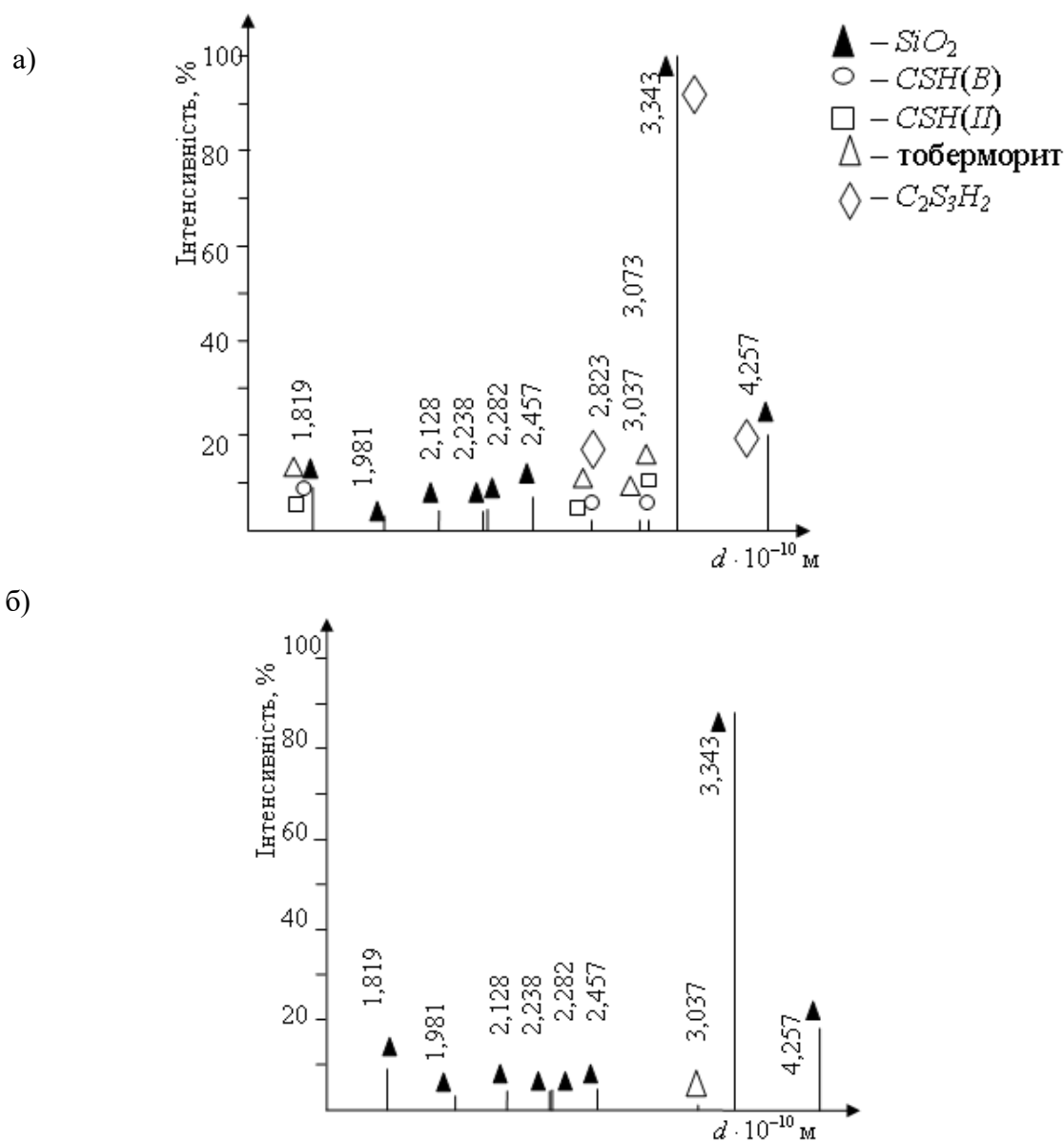


Рис. 2. Штрих-рентгенограма зразків силікатного матеріалу із застосуванням кремнеземвмісного шламу, режим автоклавування: а) 0,8 МПа – 8 год; б) 0,6 МПа – 6 год

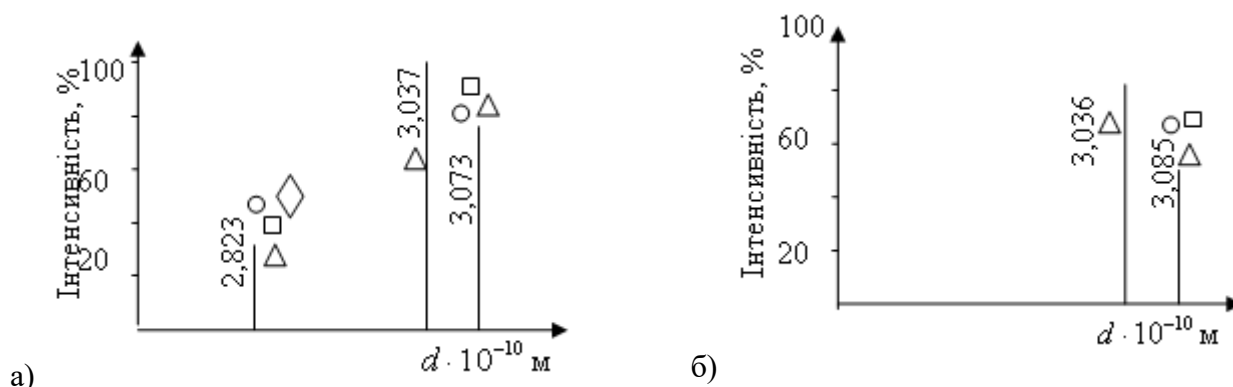


Рис. 3. Штрих-рентгенограми, отримані без фільтра, режим автоклавування:
 а) 0,8 МПа – 8 год; б) 0,6 МПа – 6 год

З аналізу результатів рентгенофазового дослідження (рис. 2) виявлено, що основною фазою зразків силікатного матеріалу є силіцій діоксид у вигляді β -кварцу, чому відповідають дифракційні максимуми $d \cdot 10^{-10}$: 4,257, 3,343, 2,457, 2,282, 2,238, 2,128, 1,981, 1,819 м [11].

На штрих-рентгенограмах обох зразків, отриманих як з фільтрами, так і без фільтрів, не виявлено максимального дифракційного відбитку $Ca(OH)_2$, що вказує на те, що навіть через 6 год гідротермальної обробки при зниженій температурі (164°C) все вапно вступило у хімічну взаємодію з кремнеземом шламу та водою, з утворенням гідросилікатів кальцію.

На штрих-рентгенограмах зразків, виготовлених при параметрах автоклавування 0,8 МПа (175 °C) – 8 год (рис. 2, а; 3, а), виявлені дифракційні максимуми, які можна ідентифікувати з гідросилікатами кальцію, $d \cdot 10^{-10}$: з $CSH(B)$ – 1,819, 2,823, 3,073 м; з $C_2SH(II)$ – 1,83, 2,823, 3,073 м; з тоберморитом – 1,819, 2,823, 3,037, 3,073 м. Можна припустити наявність гіроліту $C_2S_3H_2$ $d \cdot 10^{-10}$: 2,823, 3,343, 4,257 м, але його дифракційні відбитки максимальної інтенсивності збігаються з максимумами β -кварцу, що ускладнює ідентифікацію.

Штрих-рентгенограми зразків силікатного матеріалу, виготовлених при

зниженій температурі гідротермальної обробки 164°C, що відповідає тиску 0,6 МПа, при зменшенні терміну витримки на 2 год, мають низку відмінностей. Так, на основі штрих-рентгенограми, отриманої без фільтрів (рис. 2, б), неможливо судити про наявність гідросилікатів кальцію, тому що не виявлено їх характерних дифракційних максимумів в інтервалі $d \cdot 10^{-10}$: 2,82 – 3,07 м. Дифракційні відбитки, характерні для гідросилікатів кальцію, з'являються на штрих-рентгенограмі, отриманій без застосування фільтрів (рис. 3, б). З великою імовірністю можна ідентифікувати $d \cdot 10^{-10}$: з $CSH(B)$ – 3,085 м, з $C_2SH(II)$ – 3,085 м, з тоберморитом – 3,036, 3,085 м.

Порівняння результатів рентгенофазового аналізу зразків силікатного матеріалу, виготовлених із застосуванням кремнеземвмісного шламу при загальноприйнятих параметрах автоклавної обробки (0,8 МПа – 8 год) та виготовлених за енергозберігаючим режимом (0,6 МПа – 6 год), показало, що зменшення тиску та часу витримки виробів веде до зменшення кількості та інтенсивності дифракційних максимумів, характерних для гідросилікатів кальцію, що вказує як на зменшення їх кількості в кристалічній фазі, так і на зменшення розмірів кристалів новоутворень.

Висновки з дослідження:

– кремнеземвмісний шлам має високу дисперсність, його основними кристалічними фазами є $NaCl$ і $CaCO_3$, також встановлено наявність аморфного SiO_2 ;

– наявність кремнеземвмісного шламу в складі в'язучого у силікатній сировинній суміші при співвідношенні $CaO:SiO_2 = 1:1$ веде до зростання границі міцності при стиску на 12 % – з 33 до 37 МПа, порівняно зі зразками силікатного матеріалу, виготовленими на вапняно-піщаному в'язучому (параметри автоклавування – 0,8 МПа – 8 год). Зростання міцності зразків, що містять шлам, пояснюється наявністю активного високодисперсного кремнезему, а також переходом натрій хлориду в розчин у вигляді катіонів Na^+ та хлорид-аніонів. Наявність даних іонів у розчині прискорює формування фаз гідросилікатів кальцію та сприяє зміцненню елементарних контактів та формуванню щільної структури силікатного матеріалу;

– зразки силікатного матеріалу, що виготовлені із застосуванням шламу, показали високе значення границі міцності при стиску – 27 МПа, при знижених

параметрах гідротермальної обробки 0,6 МПа – 6 год;

– основною фазою в складі зразків силікатного матеріалу, виготовленого із застосуванням шламу, є фаза β -кварцу; а також наявна фаза $CaCO_3$. Зразки, отримані при параметрах гідротермальної обробки 0,8 МПа – 8 год, містять фази гідросилікатів кальцію – $CSH(B)$, $C_2SH(II)$, тобермориту $11,3 \times 10^{-10}$ м та з деякою імовірністю – гіроліту $C_2S_3H_2$. Зразки, отримані при параметрах обробки 0,6 МПа – 6 год, відрізняються меншою кількістю гідросилікатів кальцію, а також їх меншою кристалічністю;

– використання шламу дозволяє утилізувати промислові відходи, приводить до зменшення енергетичних витрат на помел піску. Зменшення технологічних параметрів гідротермальної обробки до 0,6 МПа – 6 год, приводить до збільшення продуктивності автоклава та одночасно до зменшення об'єму природного газу, спожитого для отримання водяної пари під тиском, внаслідок чого знижується екологічне навантаження на навколишнє природне середовище.

Список літератури

1. Горчаков, Г.И. Строительные материалы [Текст]: учеб. для студ. строит. специальн. висш. учебн. завед / Г.И. Горчаков, Ю.М. Баженов. – М.: Стройиздат, 1986. – 688 с.
2. Kalousek, G.L. Studies in the lime-rich crystalline solid phases in the system lime-silica-water [Text] / G.L. Kalousek, J.S. Logindise, V.H. Dodson // J. Amer. Ceram. Soc. – 1954. – Vol. 37. – № 1. – P. 7 – 13.
3. Бутт, Ю.М. Твердение вяжущих при повышенных температурах [Текст] / Ю.М. Бутт, Л.Н. Рашкович. – М.: Госстройиздат, 1969. – 232 с.
4. Хинт, И.А. Основы производства силикатных изделий [Текст] / И.А. Хинт. – Л.: Госстройиздат, 1962. – 604 с.
5. Taylor, H.F.W. The Calcium Silicate Hydrates [Text] / H.F.W. Taylor // V Internat. Symposium on the Chemistry of Cement. – Tokio, 1968. – Part 1. – P. 1-26.
6. Мчедлов-Петросян, О.П. Химия неорганических строительных материалов [Текст] / О.П. Мчедлов-Петросян. – 2-е изд., перераб. и доп.. – М.: Стройиздат, 1988. – 304 с.
7. Бабушкин, В.И. Термодинамика силикатов [Текст] / В.И.Бабушкин, Г.М. Матвеев, О.П. Мчедлов-Петросян. – М.: Стройиздат, 1986. – 408 с.

8. Кисельова, С.О. Енерго- і ресурсозберігаюча технологія силікатної цегли [Текст]: автореф. дис.... канд. техн. наук: спец. 05.23.05 «Будівельні матеріали та виробництво» / Кисельова Світлана Олександрівна; Українська держ. акад. залізничного транспорту. – Харків, 2011. – 21 с.

9. Глинка, Н.Л. Общая химия [Текст]: учеб. пос. для студ. вузов / Н.Л. Глинка. – 19-е изд., перераб. – Л.: Химия, 1977. – 720 с.

10. Плугин, А.Н. Электрогетерогенные взаимодействия при твердении цементных вяжущих [Текст]: автореф. дис. ... на соискание уч. степени д-ра хим. наук: спец. 02.00.11 «Коллоидная химия» / А.Н. Плугин. – К., 1989. – 33 с.

11. Горшков, В.С. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ [Текст] / В.С. Горшков, В.В. Тимашев, В.П. Савельев. – М.: Высш. шк., 1981. – 335 с.

Ключові слова: система $CaO - SiO_2 - H_2O$, фазоутворення, гідросилікати кальцію, силікатна цегла, промислові відходи, кремнеземвмісний шлам, енергозбереження.

Анотації

У дослідженні розглянуто особливості процесів фазоутворення в системі $CaO - SiO_2 - H_2O$ при наявності тонкодисперсного кремнеземвмісного шламу, основними фазами шламу є $NaCl$, $CaCO_3$ та аморфний SiO_2 . Установлено, що заміна шламом піску у в'язучому, при співвідношенні $CaO : SiO_2 = 1:1$ позитивно впливає на фізико-механічні властивості силікатного матеріалу. Силікатний матеріал, виготовлений з застосуванням шламу, містить фази гідросилікатів кальцію – $CSH(B)$, $C_2SH(II)$, тоберморит $11,3 \times 10^{-10}$ м. При енергозберігаючих параметрах автоклавної обробки (0,6 МПа – 6 год) отримано зразки силікатної цегли з границею міцності при стиску 27 МПа.

Исследованы особенности процессов фазообразования в системе $CaO - SiO_2 - H_2O$ в присутствии тонкодисперсного кремнеземсодержащего шлама, основными фазами шлама являются $NaCl$, $CaCO_3$ и аморфный SiO_2 . Установлено, что замена шламом песка в вяжущем при отношении $CaO : SiO_2 = 1 : 1$ положительно влияет на физико-механические свойства силикатного материала. Силикатный материал, изготовленный с применением шлама, содержит фазы гидросиликатов кальция – $CSH(B)$, $C_2SH(II)$, тоберморит $11,3 \times 10^{-10}$ м. При энергосберегающих параметрах автоклавной обработки (0,6 МПа – 6 год) получены образцы силикатного кирпича с пределом прочности при сжатии 27 МПа.

The features of phase formation processes in the system of $CaO - SiO_2 - H_2O$ in presence micronized silica containing slam. Main phases of slam are $NaCl$, $CaCO_3$ and amorphous SiO_2 . It is determinade that replacement of sand by slam in the binder (at the ratio of $CaO : SiO_2 = 1:1$) influences positively on physical and mechanical properties of silicate material. Silicate material, produced with the use of slam, contains the phases of calcium silicate hydrations ($CSH(B)$, $C_2SH(II)$, tobermorite $11,3 \times 10^{-10}$ м). The standards of silicate brick with compressive strength 27MPa are obtained at the energysaving parameters of autoclave treatment (0,6 МПа – 6 h).

УДК 666.9.015

*Д-р техн. наук Л.Й. Дворкін,
канд. техн. наук Ю.В. Гарніцький,
асп. В.В. Марчук,
студ. І.В. Фірсов (НУБГП)*

*L.I. Dvorkin, Y.V. Harnitskij, V.V. Marchuk,
I.V. Firsov*

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ ТЕПЛОЛОГІСНОЇ ОБРОБКИ БЕТОНІВ НА ОСНОВІ ЗОЛОВМІСНИХ ЦЕМЕНТІВ НИЗЬКОЇ ВОДОПОТРЕБИ

OPTIMIZATION OF CURING CONDITIONS OF CONCRETE, BASED ON THE CEMENTS OF LAW WATER DEMAND USING FLY-ASH

Важливим технологічним процесом, який впливає на структуру й експлуатаційні властивості бетонних та залізобетонних конструкцій є тепловологісна обробка (ТВО). Ця технологічна стадія в сучасних умовах є ефективним методом прискорення твердіння, що забезпечує скорочення процесу виробництва та підвищення продуктивності. Вона багато в чому зумовлює кінцеві фізико-механічні властивості бетону, і застосування певних режимів дозволяє в тій чи іншій мірі керувати процесами структуроутворення. Це особливо важливо для бетонів виробів, до яких ставляться підвищені вимоги за довговічністю, наприклад для дорожнього чи водогосподарського будівництва. У цьому випадку слід застосовувати "м'які", низькотемпературні режими, і в той же час необхідно досягти достатньої розпалубочної і передаточної міцності.

Як відомо, тепла обробка значною мірою прискорює твердіння бетонів на малоактивних цементах, ніж на в'язучих підвищеної активності. Однак у заводському виробництві для одержання максимально можливої абсолютної міцності бетону в короткі терміни доцільно застосовувати швидкотверднучі цементы та цементы підвищених марок. Тому досить

ефективними можуть бути цементы низької водопотреби (ЦНВ) з нормальною густиною цементного тіста 17...19 %. Використання ЦНВ дозволяє економити до 70 % найбільш дорогого компоненту портландцементу – клінкеру, або, при потребі, збільшувати міцнісні показники [1, 2]. Бетони на основі пропонованого в'язучого характеризуються високою морозостійкістю, водонепроникністю і тріщиностійкістю. Їх водопоглинання нижче, ніж у звичайних бетонах в 2,0-2,5 рази, а деформація усадки і повзучості – на 10-20 % [1]. Ці фактори обумовлюють високу довговічність конструкцій з використанням таких бетонів. Найвища активність ЦНВ та міцність бетонів на їх основі були отримані при використанні у цементі поряд з клінкером активних мінеральних добавок - доменного шлаку та золи-виносу [2,3]. Застосування золи-виносу доцільне також через те, що її висока дисперсність та розмелююча здатність суттєво знижують енергозатрати на помел.

Оскільки ЦНВ належить до швидкотверднучих в'язучих, то відомі на сьогодні їх дослідження проводилися тільки при твердінні в нормальних умовах. Однак, на наш погляд, цікаво було б дослідити особливості твердіння ЦНВ в умовах ТВО, тому що це може бути

використано як резерв підвищення міцності або можливого подальшого зниження вмісту клінкеру, що дозволить ще більше здешевити пропонувані в'язучі. При цьому найбільш доцільними є низькоенергоємні режими ТВО.

Метою даної роботи було встановлення оптимальних параметрів режиму ТВО, а також його вплив на кінетику набору міцності й експлуатаційні властивості бетонів на основі золівмісних ЦНВ.

Як вихідні матеріали використували:

- як компоненти ЦНВ: портландцемент ПЦ ІІ/А-ІІІ-500 з таким мінералогічним складом клінкеру: C_3S – 57,1 %; C_2S – 21,27 %; C_3A – 6,87 %; C_4AF – 12,19 %; золу-виносу Бурштинської ТЕС, комплексний модифікатор у складі:

суперпластифікатор (СП) полікарбоксилатного типу SikaViscoCrete 225 та інтенсифікатор помелу – пропіленгліколь;

- крупний заповнювач - базальтовий щебінь з $D_{\max}=20$ мм,

- дрібний заповнювач – кварцовий пісок з $M_k=1,9$.

З урахуванням речовинного складу портландцементу склад отриманого в'язучого був такий: клінкер – 50 %, шлак – 12 %, зола-виносу – 38 %, СП – 0,4...1,0 %, пропіленгліколь – 0,04 %.

З метою досягнення заданого рівня значущості при мінімальній кількості дослідів використовували математичне планування експерименту. Був реалізований трирівневий чотирифакторний план B_4 [4], умови планування якого наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Умови планування експерименту

Фактори впливу		Рівні варіювання факторів			Інтервал варіювання
		-1	0	+1	
Натуральний вид	Кодовий вид				
Вміст добавки СП у ЦНВ, %	X_1	0,4	0,7	1,0	0,3
Водоцементне відношення В/Ц	X_2	0,25	0,3	0,35	0,05
Час ізотермічної витримки, τ_{iz} , год	X_3	4	6	8	2
Максимальна температура T_{iz} , $^{\circ}C$	X_4	60	75	90	15

У ході досліджень у кожній точці плану для оцінки впливу факторів та ефективності ТВО на міцність бетонів виготовляли стандартні зразки-куби (10x10 см), які тверділи у нормальних умовах. Водопотреба бетонної суміші в усіх точках була однаковою. Теплова обробка проводилась у лабораторній пропарювальній камері за таким режимом: попереднє витримання – 2 год; піднімання температури зі швидкістю $25^{\circ}C/год$; ізотермічна витримка – згідно з умовами планування (табл. 1); «термосне»

охолодження. Після ТВО визначали міцність зразків на стиск через 4 год та у віці 28 діб, а також зразків, які тверділи без ТВО.

Матриця планування та отримані експериментальні результати наведені в табл. 2. У графі 10 зазначена витрата портландцементного клінкеру на 1 м^3 бетону, а в графі 11 – її відношення до міцності бетону після ТВО. Цей показник можна вважати одним із критеріїв енергоефективності бетону в цілому [5] та режиму його ТВО зокрема.

Матриця планування та експериментальні результати

№ п/п	Фактори впливу				Рухливість*	Міцність на стиск, МПа у віці:			Витрата клінкеру (Кл), кг/м ³	$\frac{Кл}{R_{ТВО}}$, кг/МПа
	СП, %	В Ц	T _{із} , год	t _{із} , °C		4 год після ТВО	28 діб після ТВО	28 діб НТ**		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1,0	0,35	8	90	РК 60	57,3	59,0	43,0	160	2,8
2	1,0	0,35	8	60	РК 59,5	52,8	56,0	42,8	160	3,0
3	1,0	0,35	4	90	РК 58,5	55,1	57,6	44,9	160	2,9
4	1,0	0,35	4	60	РК 59	47,9	56,9	41,8	160	3,3
5	1,0	0,25	8	90	РК 50	77,6	81,5	68,8	260	3,4
6	1,0	0,25	8	60	РК 50,5	71,9	79,0	68,1	260	3,6
7	1,0	0,25	4	90	РК 49	74,0	80,1	68,8	260	3,5
8	1,0	0,25	4	60	РК 49,5	70,1	77,4	67,3	260	3,7
9	0,4	0,35	8	90	ОК 5,5	56,2	60,6	44,9	160	2,8
10	0,4	0,35	8	60	ОК 5	51,4	60,2	43,9	160	3,1
11	0,4	0,35	4	90	ОК 5,5	53,4	60,7	44,7	160	3,0
12	0,4	0,35	4	60	ОК 6	47,9	59,1	44,2	160	3,3
13	0,4	0,25	8	90	Ж 3	80,0	82,1	71,2	260	3,3
14	0,4	0,25	8	60	Ж 4	74,6	80,2	70,5	260	3,5
15	0,4	0,25	4	90	Ж 5	77,9	80,1	70,8	260	3,3
16	0,4	0,25	4	60	Ж 4	72,8	78,9	70,2	260	3,6
17	1,0	0,3	6	75	РК 55	56,3	64,2	54,5	216	3,8
18	0,4	0,3	6	75	ОК 3	57,1	65,1	55,0	216	3,8
19	0,7	0,35	6	75	ОК 13	50,5	60,2	44,3	160	3,2
20	0,7	0,25	6	75	ОК 7	74,3	78,5	69,2	260	3,5
21	0,7	0,3	8	75	ОК 10,5	60,0	66,3	55,1	216	3,6
22	0,7	0,3	4	75	ОК 10,5	58,4	65,2	55,6	216	3,7
23	0,7	0,3	6	90	ОК 11	62,4	66,2	56,5	216	3,5
24	0,7	0,3	6	60	ОК 10	58,1	62,9	55,0	216	3,7

* - РК – розпалвання конуса, см; ОК – осідання конуса, см; Ж – жорсткість, с.

** - зразки нормального твердіння.

Після обробки й статистичного аналізу експериментальних даних отримали рівняння регресії міцності пропареного бетону:

- через 4 год після ТВО:

$$R_{ст}^{ТВО} = 58,3 - 0,46 \cdot x_1 - 11,24 \cdot x_2 + 1,36 \cdot x_3 + 2,6 \cdot x_4 + 0,8 \cdot x_1 x_2 + 0,14 \cdot x_1 x_3 + 0,26 \cdot x_2 x_3 - 1,7 \cdot x_1^2 + 4,0 \cdot x_2^2 + 0,8 \cdot x_3^2 + 1,85 \cdot x_4^2;$$

- у віці 28 діб:

$$R_{ст}^{28} = 65,04 + 0,46 \cdot x_1 - 10,5 \cdot x_2 + 0,5 \cdot x_3 + 0,97 \cdot x_4 - 0,49 \cdot x_1 x_2 + 0,24 \cdot x_1 x_4 - 0,3 \cdot x_2 x_3 - 0,16 \cdot x_2 x_4 - 0,5 \cdot x_1^2 + 4,2 \cdot x_2^2 + 0,6 \cdot x_3^2 - 0,6 \cdot x_4^2.$$

Графічні залежності міцності пропареного бетону на основі золовмісних ЦНВ від технологічних факторів через 4 год. після ТВО наведені на рис. 1, а у віці 28 діб – на рис. 2.

Їх аналіз дозволяє розмістити фактори впливу у такий ряд за значущістю: $x_2 > x_4 > x_3 > x_1$. Як і очікувалось, найбільш впливовим є фактор В/Ц, однак

простежується його деяка взаємодія з параметрами теплової обробки – тривалістю та максимальною температурою. Серед цих двох факторів температура є більш впливовою, однак збільшення тривалості ізотермічної витримки на 2 год дозволяє компенсувати зниження максимальної температури на 15°C (точки 22 і 24) за інших рівних умов.

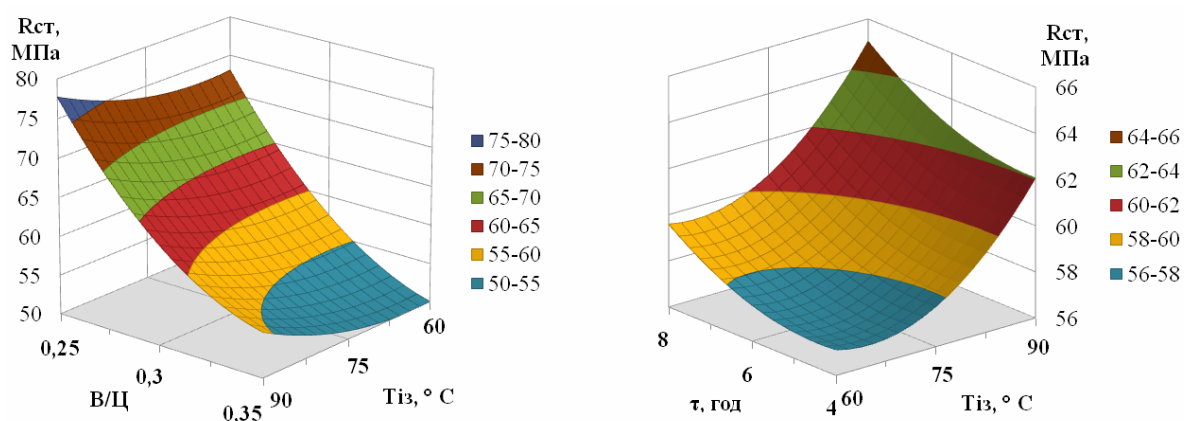


Рис. 1. Вплив технологічних факторів на міцність бетону на основі золовмісних ЦНВ після ТВО

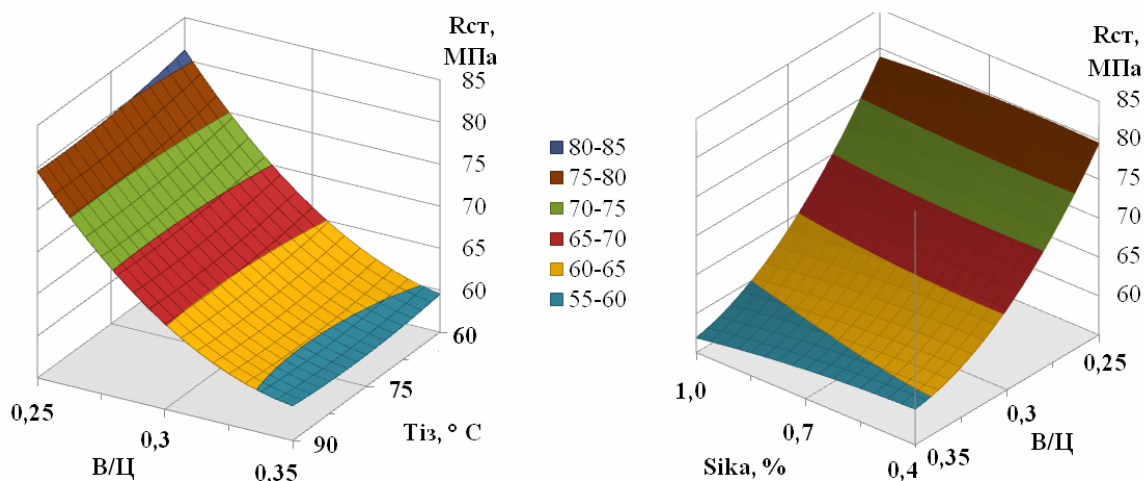


Рис. 2. Вплив технологічних факторів на міцність пропареного бетону у віці 28 діб на основі золовмісних ЦНВ

У випадку збільшення ізотермічної витримки з 4 до 8 год спостерігаємо зростання міцності в межах 10...15 %, так само, як і при збільшенні температури ТВО

на $25...30^{\circ}\text{C}$. Слід урахувати, що підвищення температури ТВО більш суттєво підвищує енергозатрати, ніж збільшення тривалості, до того ж "м'які"

режими необхідні з точки зору підвищення довговічності виробів. Підвищення кількості суперпластифікатора у в'язучому з 0,4 до 0,7...1,0 % може супроводжуватись незначним зниженням міцності пропареного бетону (рис.2), але при цьому отримуємо суміші литої консистенції з розпливанням конуса до 60 см, що є позитивним моментом при виготовленні сучасних високотехнологічних бетонів, здатних до самоущільнення.

У віці 28 діб міцність бетону з різними режимами ТВО практично вирівнюється за інших рівних умов. Міцність зразків нормального твердіння в усіх випадках нижча, ніж пропарених (до 25 %) навіть при низькотемпературних режимах ТВО. Це можна пояснити більш суттєвою інтенсифікацією процесів твердіння під час ТВО бетонів на основі

золівмісних ЦНВ, ніж бетонів на звичайних портландцементях.

Для оцінки ефективності використання цементного клінкеру в пропареному бетоні можна використати відношення його витрати на 1 м³ бетону до міцності бетону через 4 год після ТВО (кілограм на мегапаскаль). Зменшення цього показника свідчить про вищу ефективність використання клінкеру. Для бетонів міцністю 35-40 МПа нормального твердіння цей критерій, як правило, знаходиться в межах 12...14 [5], для бетонів міцністю 60-80 МПа з використанням сучасних суперпластифікаторів і мікрокремнезему 7...10. Для досліджених складів зазначений коефіцієнт лежить у межах 2,8...3,8 (табл. 2 та рис. 3), що свідчить про високу ефективність ТВО при використанні в бетоні золівмісних цементів низької водопотреби.

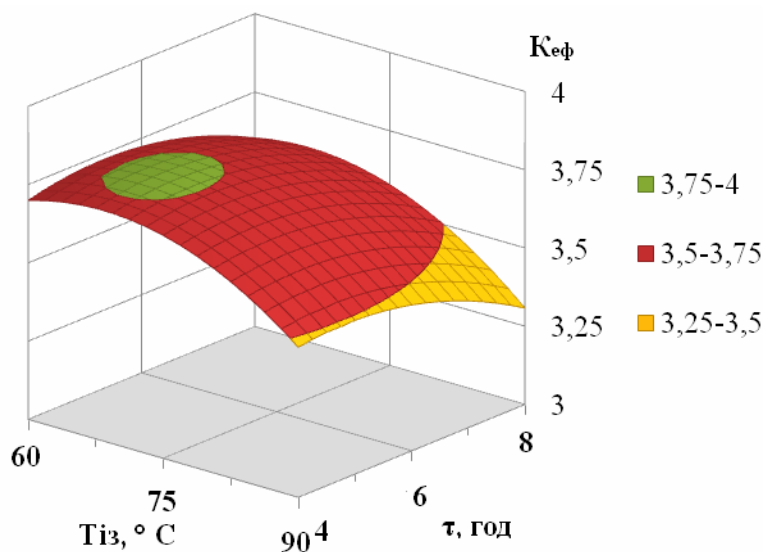


Рис. 3. Вплив технологічних факторів на ефективність використання клінкеру в бетонах на основі золівмісних ЦНВ

Цікавим є той факт, що збільшення тривалості ізотермічної витримки зменшує показник навіть більше, ніж підвищення її температури. Тому можна вважати, що низькотемпературні режими ТВО є не тільки менш енергоємними, але й більш

ефективними для бетонів на золівмісних ЦНВ.

Висновки

1. Установлено, що бетони на основі золівмісних цементів низької водопотреби, які пройшли тепловологісну обробку,

характеризуються міцністю, яка на 7...25 % вища від міцності зразків, які тверділи за нормальних умов. Теплова обробка в температурному інтервалі 60...75 °С супроводжує зростання міцності на 7...12 % в порівнянні з нормальним режимом твердіння, а в температурному інтервалі 75...90 °С – на 10...24 % при різній тривалості ізотермічної витримки.

2. Серед параметрів теплової обробки вплив її температури на міцність безпосередньо після ТВО є більш значним, ніж тривалість теплової обробки. Однак збільшення тривалості ізотермічного витримання дозволяє компенсувати зниження температури без підвищення сумарних енергозатрат. Через 4 год після ТВО для досліджених бетонів навіть при мінімальних її параметрах досягається відпускна міцність більше 90 % від марочної.

3. У віці 28 діб вплив параметрів ТВО на міцність нівелюється. Використання в бетоні золівмісних ЦНВ дозволяє

досягти марочної міцності пропареного бетону 56...60,7 МПа при витраті в'язучого 320 кг/м³ та 77,4...82,1 МПа при витраті в'язучого 520 кг/м³.

4. Одним із критеріїв ефективності використання портландцементного клінкеру в бетоні є відношення його витрати на 1 м³ до досягнутої міцності бетону. Цей же показник можна використати для оцінки ефективності теплової обробки, якщо враховувати міцність після ТВО. Обробка отриманих даних свідчить про те, що для підвищення ефективності ТВО доцільне збільшення обох її параметрів – тривалості та температури і визначальним фактором при цьому стають можливі енергозатрати.

5. Для виробів, до яких ставляться підвищені вимоги за довговічністю, доцільною є ТВО бетонів на основі золівмісних ЦНВ при температурі не більше 60⁰С з тривалістю ізотермічної витримки 4...6 год.

Список літератури

1. Цементы низкой водопотребности: новые результаты и перспективы [Текст] / Б.Э. Юдович [и др.] // Цемент и его применение. – 2006. – Июль-август. – С. 80-84.
2. Високоміцні бетони на цементах низької водопотреби з використанням пиловидних відходів промисловості [Текст] / Л.Й. Дворкін [та ін.]. // Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка: наук.-техн. зб.; Український науково-дослідний і проектно-конструкторський інститут будівельних матеріалів та виробів «НДІБМВ». – К.: Знання, 2012. – Вип. 43. – С. 73-80.
3. Батраков, В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика [Текст]. – М.: 1998. – 768 с.
4. Дворкін, Л.Й. Розв'язування будівельно-технологічних задач методами математичного планування експерименту [Текст] / Л.Й. Дворкін, О.Л. Дворкін, В.В. Житковський. – Рівне: НУВГП, 2011. – 174 с.
5. Дворкин, Л.И. Снижение расхода цемента и топлива в производстве сборного железобетона [Текст]. – К.: Вища шк., 1985.

Ключові слова: цементы низької водопотреби, зола-виносу, тепловологісна обробка, довговічність бетону.

Анотації

Наведені результати дослідження впливу режимів тепловологісної обробки на міцність бетонів на основі золівмісних цементів низької водопотреби. Встановлено оптимальні параметри режимів тепловологісної обробки.

Приведены результаты исследования влияния режимов тепловлажностной обработки на прочность бетонов на основе золосодержащих цементов низкой водопотребности. Установлены оптимальные параметры режимов тепловлажностной обработки.

It is shown the findings of an investigation into curing conditions influence on the concrete strength, based on the cements of low water demand, using fly-ash. Optimal curing conditions parameters have been determined.

УДК 666.974.2

*Канд. техн. наук А.Н. Корогодская,
д-р техн. наук Г.Н. Шабанова (НТУ «ХПИ»)*

A.N. Korogodska, G.N. Shabanova

**ОГНЕУПОРНЫЙ БЕТОН НА ОСНОВЕ АЛЮМОБАРИЕВОГО
ХРОМСОДЕРЖАЩЕГО ЦЕМЕНТА**

**REFRACTORY CONCRETE BASED ON ALUMINUM-BARIUM
CEMENT CONTAINING CHROMIUM**

Интенсификация производственных тепловых процессов в различных отраслях науки и техники требует создания новых конструкционных материалов, которые способны кроме воздействия высоких температур противостоять агрессивному воздействию расплавов, растворов электролитов, высокого давления. Огнеупорные материалы, существующие в настоящее время, преимущественно являются штучными изделиями и требуют дополнительного шовного скрепления, что значительно снижает срок эксплуатации. Замена искусственных огнеупоров на монолитную бесшовную бетонную футеровку позволяет выполнить все необходимые требования по

эксплуатационной надежности теплового агрегата [1-3].

Основным направлением при разработке технологических решений образования безобжиговых огнеупоров является подбор оптимального качественного и вещественного состава заполнителя, обеспечивающего формирование при нагреве до температуры эксплуатации необходимых физико-механических и технических характеристик рабочего слоя футеровки.

В качестве связки при производстве таких огнеупоров чаще всего используются алюминатные цементы, а в последнее время – шпинельные цементы, в том числе и на основе алюминатов бария.

Шпинельные цементы относятся к высокоогнеупорным, быстротвердеющим высокопрочным вяжущим [4].

Анализ литературных данных показывает, что получение бетонов с использованием шпинельных цементов на основе алюминатов и хромитов бария с комплексом заданных эксплуатационных

характеристик является актуальной проблемой.

Большую заинтересованность составляет изучение влияния количественного и качественного соотношения алюминатов и хромитов бария на физико-механические и технические свойства получаемых цементов (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав и физико-механические свойства алюмобариевых хромсодержащих цементов

№ п/п	Химический состав, масс. %			В/Ц	Сроки схватывания, час-мин		Предел прочности при сжатии, МПа, в возрасте, сут			Т _{плавления} , °С
	BaO	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃		начало	конец	3	7	28	
1	73,6	4	22,4	0,22	2-05	3-20	10,2	12,3	18,6	1424
2	72,1	8	19,9	0,25	2-00	3-05	10,2	14,4	26,3	1460
3	70,6	12	17,4	0,27	1-20	2-55	10,2	18,6	22,4	1548
4	69,1	16	14,9	0,33	1-00	2-40	10,2	28,6	30,6	1616
5	67,6	20	12,4	0,23	0-35	2-30	16,3	30,6	46,9	1672
6	66,1	24	9,9	0,24	0-25	1-50	22,5	36,7	44,1	1716
7	64,5	28	7,5	0,23	0-25	1-40	28,6	38,7	53,9	1760
8	63,0	32	5,0	0,22	0-25	0-55	75,4	87,7	90,2	1790
9	61,5	36	2,5	0,21	Мгновенно		31,2	46,7	48,9	1816

Тщательное смешивание и помол исходных сырьевых компонентов проводились в лабораторной шаровой мельнице до полного прохода через сито №006. Полученный шлам высушивался при температуре 100-110°C и брикетировался на гидравлическом прессе. Обжиг образцов проводился в криптоловой печи при температуре 1320-1380°C в зависимости от фазового состава с изотермической выдержкой при максимальной температуре 3 час. Обжиг производился в тиглях под слоем криптола для исключения окисления Cr³⁺ → Cr⁶⁺. После обжига образцы измельчались до полного прохода через сито № 006. Определение физико-механических свойств производилось в

соответствии с методикой малых образцов Стрелкова М.И. [5].

В результате физико-механических испытаний установлено, что полученные цементы относятся к воздушным вяжущим материалам с водоцементным отношением от 0,22 до 0,33; являются быстротвердеющими (начало схватывания от 25 мин до 2 час 5 мин, конец схватывания от 55 мин до 3 час 20 мин); быстротвердеющими (прочность при сжатии после 2 сут твердения составляет от 10,0 до 75,0 МПа); высокопрочными (прочность при сжатии в возрасте 28 сут от 18,0 до 90,0 МПа) с высокими температурами плавления (от 1424 до 1816°C). Наиболее перспективным, на наш взгляд, является состав № 8.

Клинкер цемента оптимального состава был исследован с помощью рентгенофазового метода анализа [6]. Установлено, что основными фазами полученного алюмобариевого хромсодержащего цемента являются $BaAl_2O_4$ ($d \cdot 10^{-10} = 4,516; 4,40; 4,022; 3,155; 2,608; 2,503; 2,459; 2,262; 2,245; 2,199;$

$2,012; 1,978; 1,951; 1,792; 1,711; 1,64; 1,594; 1,578$ м) и $Ba_3Cr_2O_6$ ($d \cdot 10^{-10} = 4,40; 3,19; 2,421; 2,012; 1,951; 1,64$ м). В остаточных количествах присутствует трехкомпонентное соединение $Ba_4Al_2Cr_2O_{10}$ ($d \cdot 10^{-10} = 3,411; 2,933; 2,827; 2,662; 2,375$ м). Рентгенограмма клинкера полученного цемента приведена на рис. 1.

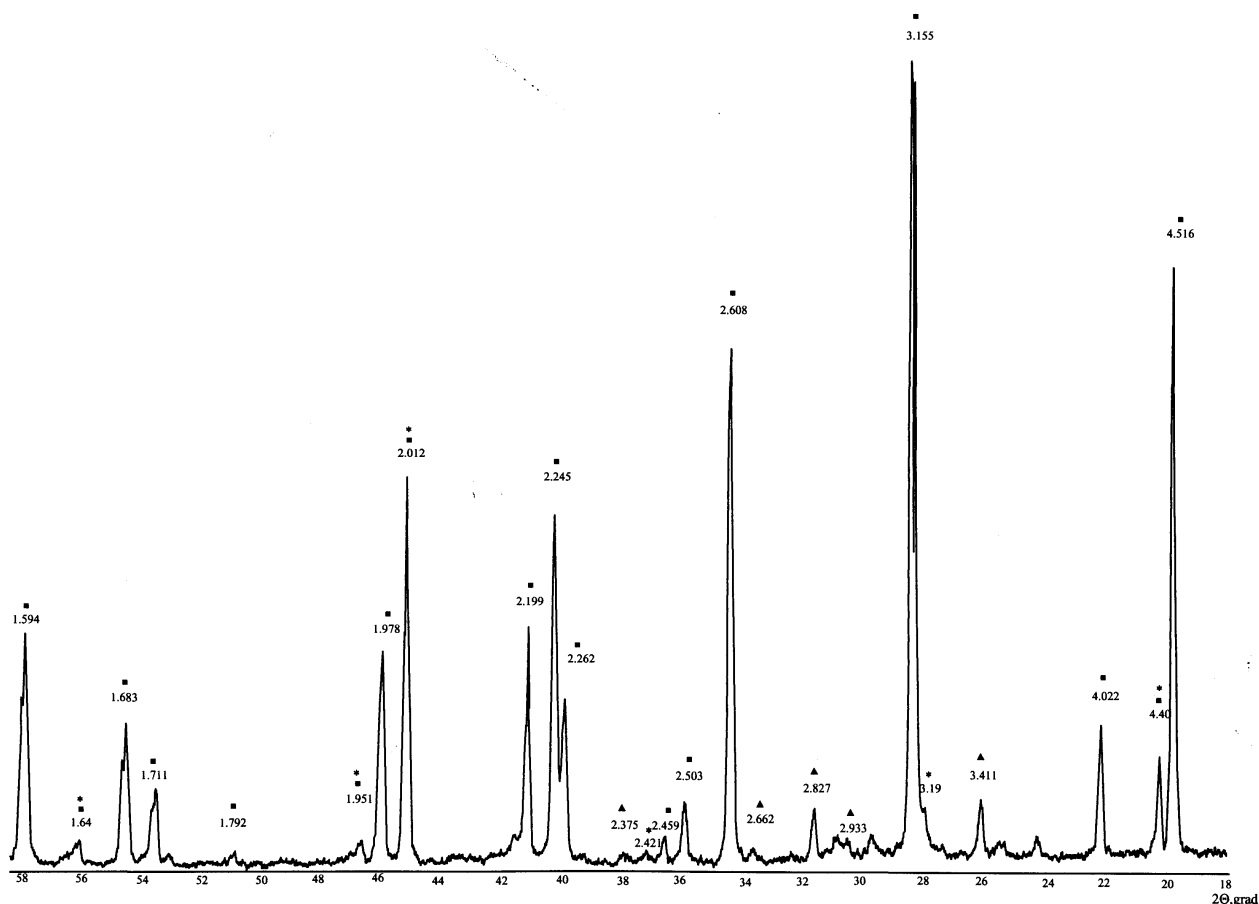


Рис. 1. Рентгенограмма клинкера алюмобариевого хромсодержащего цемента оптимального состава

Таким образом установлено, что основой клинкера цемента оптимального состава является моноалюминат бария и трехбариевый хромит.

С учетом субсолидусного строения системы $BaO-Al_2O_3-Cr_2O_3$ компоненты цемента и корунд взаимодействуют во всем интервале температур, что определяет невозможность использования данного материала в качестве заполнителя для огнеупорных бетонов [7]. В связи с этим было предположено, что в качестве

заполнителя может быть использован электроплавленный периклаз.

С помощью известных термодинамических данных для периклаза была рассчитана вероятность сосуществования основных компонентов алюмобариевого хромсодержащего цемента с MgO в соответствии с реакциями:

- 1) $BaAl_2O_4 + MgO = MgAl_2O_4 + BaO$;
- 2) $Ba_3Cr_2O_6 + MgO = MgCr_2O_4 + 3 BaO$.

Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Термодинамическая оценка энергии Гиббса реакций взаимодействия цемента с MgO

Номер реакции	Величина свободной энергии Гиббса, кДж/моль, при температуре, К						
	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
1	76,5	74,2	71,9	69,5	67,0	64,7	62,5
2	107,5	100,0	92,6	85,7	79,7	74,8	71,2

Анализ полученных данных указывает на сосуществование основных клинкерных минералов цемента с периклазом во всем исследуемом интервале температур, что позволяет использовать периклаз в качестве заполнителя для получения огнеупорного бетона.

Для получения бетона высокой прочности, плотности и однородности был проведен подбор оптимального гранулометрического состава заполнителя. Образцы-кубы размером 5×5×5 см изготавливались методом виброукладки из бетонной смеси с водотвердым отношением 0,08. Оптимизация

количественного соотношения смежных фракций заполнителя проводилась с помощью симплексно-решетчатого метода планирования эксперимента [8].

Для описания зависимости прочности бетона от количественного соотношения фракции заполнителя использовали полином неполного третьего порядка. По результатам полученных экспериментальных данных рассчитаны коэффициенты полинома, выражающего зависимость прочности и огнеупорности от количественного и гранулометрического соотношения фракций заполнителя.

Уравнения регрессии имеют вид:

$$Y_{\sigma} = 51,2 x_1 + 63,5 x_2 + 67,2 x_3 + 10,6 x_{12} - 23,2 x_{13} - 63,0 x_{23} + 493,2 x_{123}$$

$$Y_t = 1580 x_1 + 1630 x_2 + 1650 x_3 - 20 x_{12} - 260 x_{13} - 440 x_{23} + 5130 x_{123}$$

По результатам выполненных расчетов и математической обработки результатов эксперимента построены

симплекс-диаграммы «состав – прочность» и «состав – огнеупорность» для огнеупорного бетона (рис. 2 и 3).

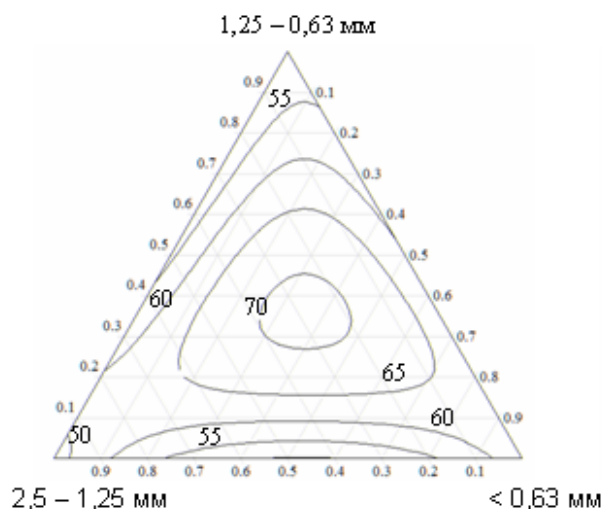


Рис. 2. Диаграмма «состав – прочность»

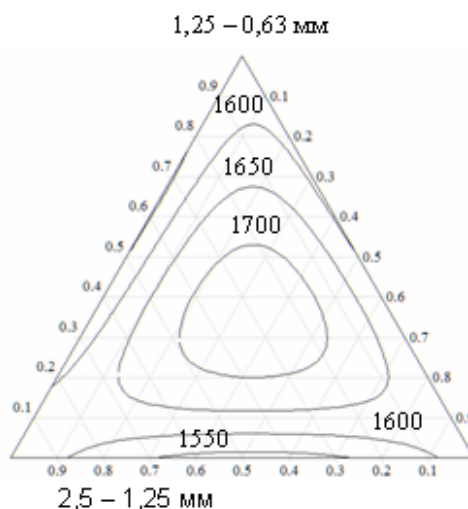


Рис. 3. Диаграмма «состав – огнеупорность»

Из результатов расчета видно, что для получения бетона высокой прочности и огнеупорности необходимо брать трехфазную смесь заполнителя со следующим количественным соотношением размеров зерен:

фракция (2,5 – 1,25) мм – 18 – 40 масс. %
 (1,25 – 0,63) мм – 27 – 44 масс. %
 < 0,63 мм – 25 – 46 масс. %

Последующие исследования бетонов проводились с учетом оптимального гранулометрического состава заполнителя.

Образцы бетонов твердели и набирали прочность на воздухе. Через 1 сут твердения бетон имел прочность 21 МПа. Для определения стойкости полученного бетона к влиянию высокой температуры образцы бетона обжигали в криптолово́й печи при температуре 1700-1750°C в течение трех часов. Охлаждение образцов проводилось вместе с печью. После обжига сколов, разрывов, трещин, проплавов и

внешних изменений образцов не выявлено. Уменьшение объема образцов составляло 1,0 %. Прочность на сжатие образцов после обжига составляла 75,8 МПа.

С помощью рентгенофазового метода анализа был исследован бетон после обжига [6]. Результаты рентгенофазового анализа приведены на рис. 4.

Установлено, что основными фазами бетона являются: MgO ($d \cdot 10^{-10} = 2,427; 2,103; 1,488$ м); BaAl₂O₄ ($d \cdot 10^{-10} = 4,537; 4,383; 3,151; 2,608; 2,243; 2,193; 2,019$ м); Ba₃Cr₂O₆ ($d \cdot 10^{-10} = 3,236; 2,871; 2,359; 2,144; 1,961; 1,717$ м), то есть взаимодействия между компонентами цемента и заполнителя при высоких температурах не происходит. По совокупности характеристик периклаз является перспективным заполнителем для получения огнеупорного бетона на основе алюмобариевого хромсодержащего цемента.

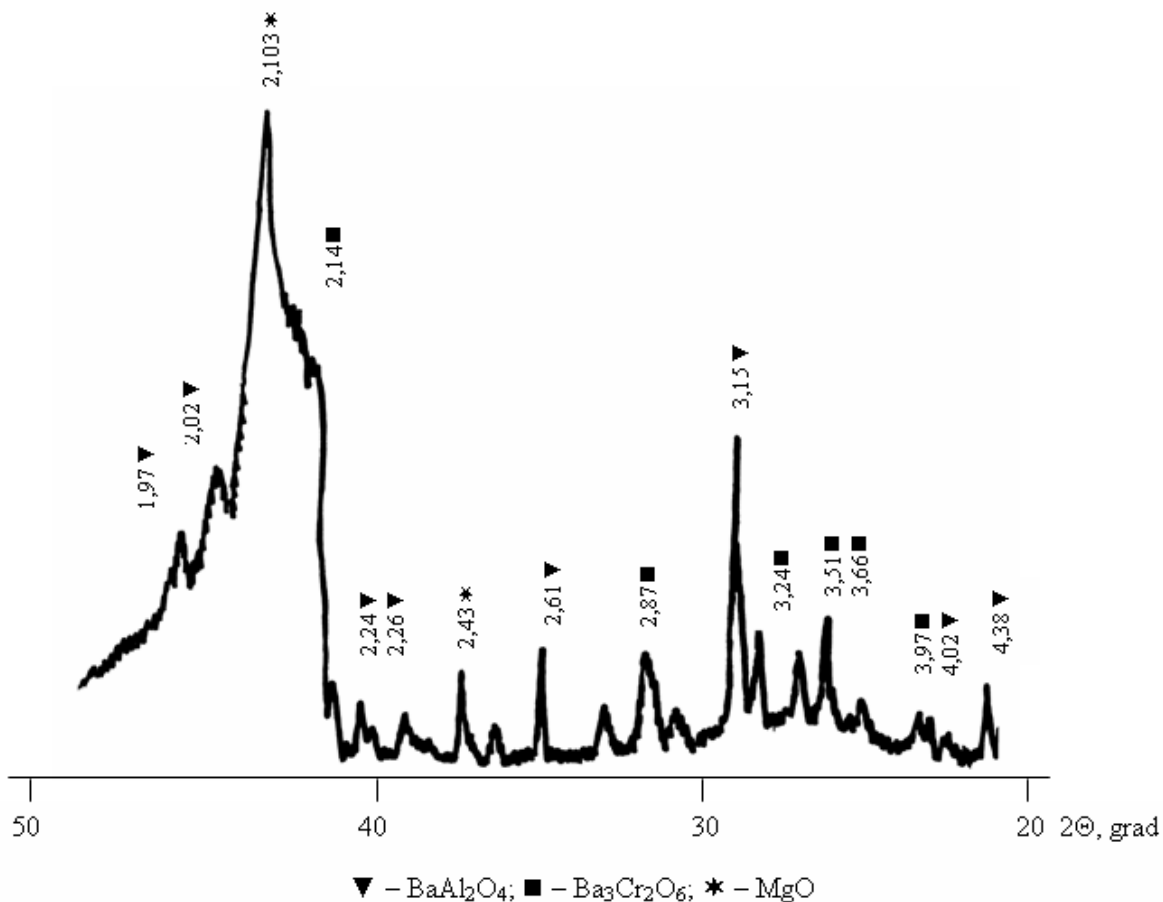


Рис. 4. Рентгенограмма образца бетона после термообработки

Для определения шлакостойкости полученного бетона были использованы основной шлак ОАО «Алчевский металлургический комбинат» и кислый шлак ОАО «Запорожсталь». Для определения глубины пропитки шлаком из бетонной смеси были отпрессованы образцы в виде кубов с размером ребра 5 см с цилиндрическим углублением диаметром 25 см и глубиной 30 см. Полученные тигли твердели на протяжении 3 суток в воздушных условиях. После этого расплавляли основной и кислый шлаки при температуре 1450°C на протяжении 2 час. После остывания тигли распиливали через центр углубления и оценивали глубину

пропитывания. Установлено, что для основного шлака глубина разъедания составляет 2,8 мм, для кислого шлака – 2 мм.

Таким образом, на основании проведенных теоретических расчетов и экспериментальных исследований установлено, что полученный бетон на основе алюмобариевого хромсодержащего цемента и заполнителя периклаза является высокопрочным, огнеупорным, шлакостойким конструкционным материалом и может быть рекомендован к использованию в качестве футеровки в высокотемпературных агрегатах различных отраслей промышленности.

Список литературы

1. Огнеупорные материалы. Структура, свойства, испытания [Текст]: справочник / Й. Алленштейн, П. Барта, Х. Бартель [и др.]; под ред. Г. Роучка, Х. Вутнау; пер. с нем. И.Г. Очаговой. – М.: Интермет Инжиниринг, 2010. – 392 с.
2. Кашеев, И.Д. Химическая технология огнеупоров [Текст] / И.Д. Кашеев, К.К. Стрелов, П.С. Мамыкин. – М.: Интермет Инжиниринг, 2007. – 752 с.
3. Огнеупоры для промышленных агрегатов и топок [Текст]: справочник: в 2 кн. Кн. 1. Производство огнеупоров / И.Д. Кашеев, В.Г. Адеева, М.Г. Ладыгичев [и др.]; под ред. И.Д. Кашеева. – М.: Интермет Инжиниринг, 2000. – 663 с.
4. Alumina cement with spinel / [G.N. Shabanova, A.N. Korogodskaya, N.K. Vernigora at al.] // 17 International Baustofftagung. 23-36 September, 2009. – Tagungsbericht. – Band 1. – Weimar, Bundesrepublik, Deutschland. – Weimar, 2009. – S. 573-578.
5. Бутт, Ю.М. Практикум по химической технологии вяжущих материалов [Текст] / Ю.М. Бутт, В.В. Тимашев. – М.: Высш. шк., 1973. – 503 с.
6. Горшков, В.С. Вяжущие, керамика и стеклокристаллические материалы: Структура и свойства [Текст]: справоч. пособие / В.С. Горшков, В.Г. Савельев, А.В. Абакумов. – М.: Стройиздат, 1994. – 584 с.
7. Строение трехкомпонентной системы $\text{BaO-Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ в области субсолидуса [Текст] / А.Н. Корогодская, Г.Н. Шабанова, В.Ю. Гофман, О.А. Гамова // Зб. наук. праць ВАТ «УкрНДІВогнетривів імені А.С. Бережного». – Харків: Каравела, 2008. – № 108. – С. 147-155.
8. Кафаров, В.В. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии [Текст] / В.В. Кафаров, С.Л. Ахназарова. – М.: Высшая школа, 1978. – 319 с.

Ключевые слова: огнеупорный бетон, алюмобариевый хромсодержащий цемент, заполнитель, периклаз, шлакоустойчивость, прочность.

Аннотации

Наведено результати розроблення вогнетривкого бетону на основі алюмобарієвого хромвмісного цементу. Встановлено, що за своїми фізико-механічними й технічними

властивостями розроблені бетони не поступаються випаленим вогнетривким виробам, що дає змогу рекомендувати їх для широкого використання як футеровок у високотемпературних агрегатах різноманітних галузей промисловості.

Представлены результаты разработки огнеупорного бетона на основе алюмобариевого хромсодержащего цемента. Установлено, что по своим физико-механическим и техническим свойствам разработанные бетоны не уступают обжиговым огнеупорным изделиям, что дает возможность рекомендовать их для широкого использования в качестве футеровок в высокотемпературных агрегатах различных отраслей промышленности.

In this article the results of development of refractory concrete on the base of the alumina-barium chromium-containing cement are presented. It was founded that on their physical, mechanical and technical properties these concretes are like fired refractory products and this makes it possible to recommend these concretes for wide use as linings in high-temperature units in various industries.

УДК 666.974.2

Канд. техн. наук Т.П. Киценко (ДонНАСА)

Kitsenko T.P.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ АЛЮМОСИЛИКАТНЫХ И КРЕМНЕЗЕМИСТЫХ ОГНЕУПОРНЫХ БЕТОНОВ НА ОСНОВЕ ЖИДКОГО СТЕКЛА

RESEARCH OF LINEAR THERMAL DEFORMATIONS OF ALUMINA-SILICATE AND SILICA REFRACTORY CONCRETES ON THE BASIS OF LIQUID GLASS

Представил д-р техн. наук, профессор А.А. Плугин

В странах СНГ доля бетонов в общем объеме потребления огнеупоров составляет примерно 15-20 % [1-3]. Одним из основных направлений современной технологии огнеупорных бетонов является разработка низко- и особонизкоцементных бетонов [1, 4-7].

В отечественной промышленности накоплен большой положительный опыт использования жидкостекольных огнеупорных бетонов. С жидким стеклом в бетоны вводится, обычно, не более 2 % Na_2O . Недостатком жидкостекольных

бетонов является то, что отвердители жидкого стекла (кремнефторид натрия, металлургические шлаки) содержат 0,5-5 % плавней. Поэтому щелочные алюмосиликатные и кремнеземистые огнеупорные бетоны на основе растворимых силикатов и алюминатов натрия со структурообразующими компонентами (отвердителями), не содержащие оксидов-плавней, являются одними из наиболее перспективных огнеупоров потому, что позволяют вводить в состав бетонов не более 2 % активного

плавня – Na_2O . Это практически не снижает огнеупорность наполнителей и заполнителей – основных носителей огнеупорных свойств бетонов.

В известных жидкостекольных композициях таких бетонов в качестве структурообразующих компонентов применяют термоактивированный каолин, или незначительную часть доменного гранулированного шлака, а в бетонах на основе алюмината натрия – тонкомолотый шамот. Однако термоактивированный каолин требует обжига при $600\text{--}750\text{ }^\circ\text{C}$ и характеризуется высокой водопотребностью, что увеличивает расход жидкого стекла, Na_2O и как следствие стоимость бетона. Жидкостекольные кремнеземистые бетоны с низким расходом доменного граншлака (1-2% CaO – активного плавня) имеют незначительную прочность после твердения в нормальных условиях и при пропаривании, что ограничивает их применение.

В Донбасской национальной академии строительства и архитектуры разработаны жидкостекольные вяжущие композиции с отвердителями, не являющимися плавнями по отношению к алюмосиликатным и кремнеземистым наполнителям и заполнителям. В качестве структурообразующих компонентов используется шамотнокаолиновая пыль-унос (ШКП) и ультрадисперсный аморфный кремнезем.

На основе разработанных вяжущих с использованием в качестве заполнителя шамота ШКН-2 и муллитокорунда подобраны составы виброформованных бетонов.

Цель настоящих исследований – определить линейные температурные деформации алюмосиликатных и кремнеземистых огнеупорных бетонов на основе жидкого стекла.

В качестве щелочных компонентов вяжущих и бетонов приняты: стекло натриевое жидкое (ГОСТ 13078-81) с силикатным модулем $M_s = \text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 3,0$.

Изменение силикатного модуля жидкого стекла осуществляли добавлением соответствующего количества раствора гидроксида натрия (ГОСТ 2263-79*) с учетом данных [8].

Линейные температурные деформации вяжущих и бетонов в процессе нагрева исследовались при помощи dilatометра с кварцевой ячейкой. Исследования производились на образцах $1 \times 1 \times 7$ см, которые выпиливались из кубов с ребром 7 см. Нагрев образцов при испытании производился со скоростью $200\text{ }^\circ\text{C}/\text{час}$.

Общие линейные температурные деформации огнеупорных бетонов при нагреве суммируются из деформаций дегидратационной усадки камня вяжущего, усадки или роста, сопровождающих спекание или модификационные превращения компонентов бетона, а также их линейного температурного расширения.

Алюмосиликатные обожженные материалы не претерпевают модификационных превращений и характеризуются примерно одинаковым коэффициентом линейного температурного расширения в температурном интервале $20\text{--}1400\text{ }^\circ\text{C}$ [9, 10]. Процессы дегидратации и спекания алюмосиликатной и кремнеземистой жидкостекольных связей идут сравнительно быстро и практически заканчиваются в процессе первого нагрева [11]. Поэтому линейные температурные деформации алюмосиликатных бетонов при первом нагреве фиксировались примерно через каждые $100\text{ }^\circ\text{C}$.

Результаты исследования температурных деформаций шамотного бетона с ШКП приведены на рис. 1. Их анализ показывает, что при первом нагреве в области температур $20\text{--}200\text{ }^\circ\text{C}$ шамотный бетон претерпевает незначительное расширение, равное $0,18\text{ мм/м}$. В области температур $200\text{--}400\text{ }^\circ\text{C}$ расширение увеличивается до $1,05\text{ мм/м}$. В температурном интервале $40\text{--}600\text{ }^\circ\text{C}$ происходит скачкообразный рост

расширения. Только в этом интервале оно равно $3,26-1,05=2,21$ мм/м, что связано, вероятно, с модификационным превращением остаточного кварца. В температурном интервале 800-1050°C бетон претерпевает заметную усадку,

связанную с появлением жидкой фазы, интенсивным спеканием и уплотнением связки. По разности между линейной деформацией при третьем и первом нагреве эта усадка при 1050°C составляет 2,27 мм/м или 0,227 %.

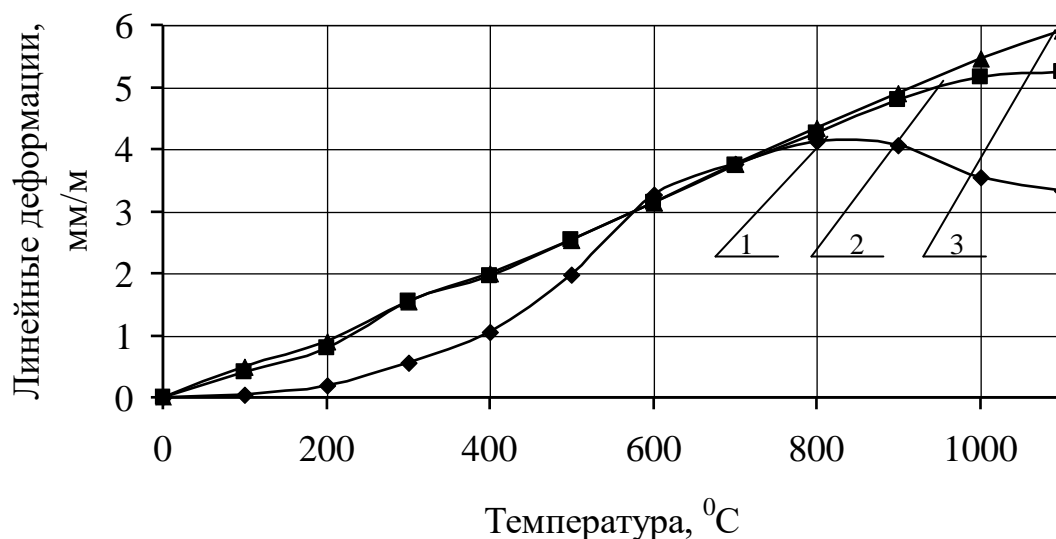


Рис. 1. Лінійні температурні деформації шамотного бетону з ШКП: 1, 2, 3 – відповідно номери прогрева стержня бетону

При втором нагріві шамотний бетон в інтервалі температур 20-900 °C підвргнутий рівномірному, прямопропорціональному температурі розширенню, що співпадає з розширенням при третьому нагріві. При дальнішому підвищенні температури до 1050 °C розширення бетону практично не спостерігається. При третьому нагріві шамотний бетон претерпує рівномірне розширення, прямопропорціональне температурі, уже во всем інтервалі випробування. Коефіцієнт лінійного температурного розширення бетону, розрахований по деформації зразка при третьому нагріві, дорівнює $5,8 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Аналогічний характер деформацій проявляє мулітокорундовий бетон з додаванням мікрокремнезема (рис. 2). Для нього характерна підвищена усадка при

температурі 100-300 °C, що складає по різниці деформацій з 3 нагрівом $2,4 - 1,08 = 1,32$ мм/м. При дальнішому нагріві практично до температури 1050°C бетон претерпує порівняльно рівномірне розширення, що відстає від розширення при наступних нагрівіх. По різниці між деформаціями при третьому і першому нагріві загальна усадка бетону становить $9,00 - 5,78 = 3,22$ мм/м або 0,32 %.

Коефіцієнт лінійного температурного розширення мулітокорундового бетону, розрахований по деформації зразка, при третьому нагріві становить $8,7 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Для кремнеземистих бетонів з додаванням мікрокремнезема, прогретих до температури 900 °C, характерний необоротний ріст, що складає після охолодження 0,30-0,44 % (рис. 3).

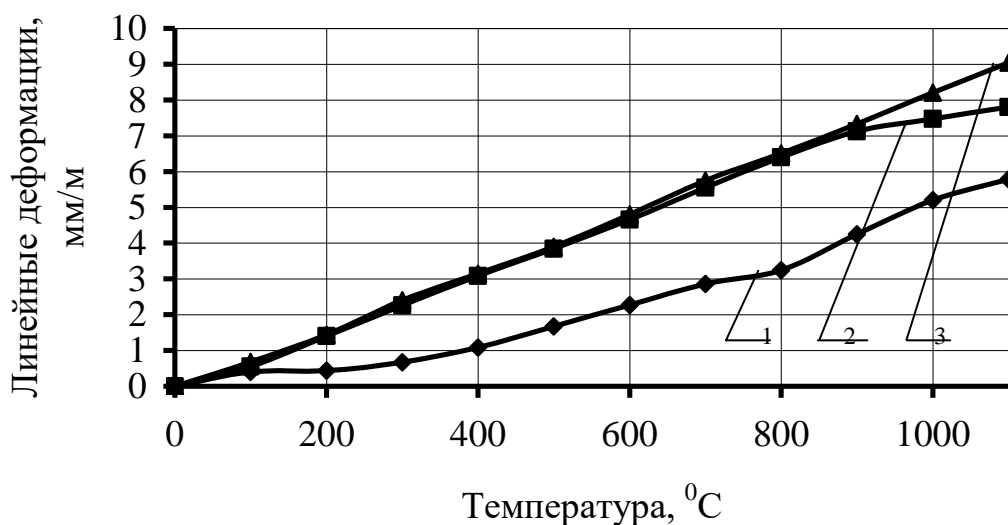


Рис. 2. Линейные температурные деформации муллитокорундового бетона с микрокремнеземом: 1,2,3 – соответственно номера прогрева

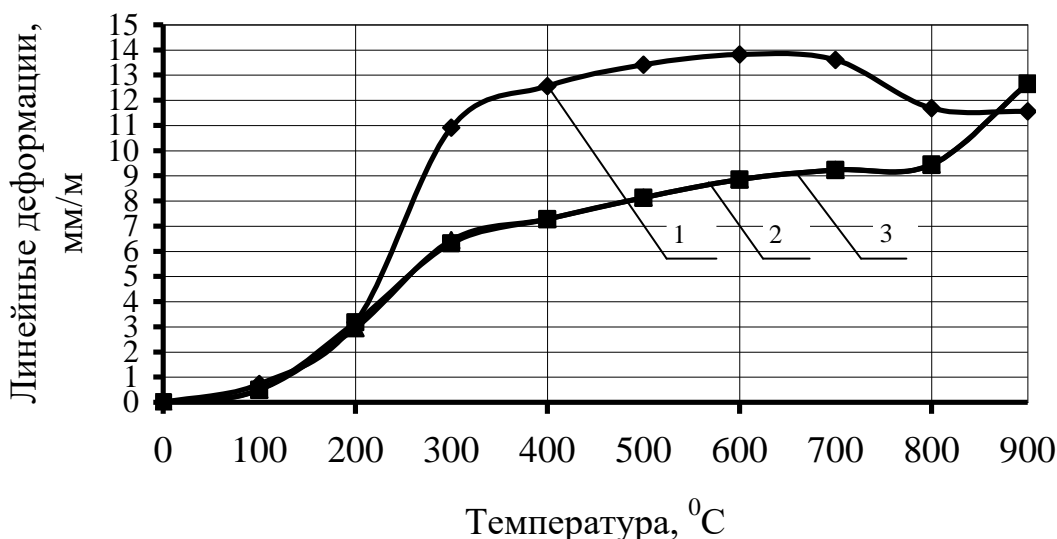


Рис. 3. Линейные температурные деформации кремнеземистого бетона с микрокремнеземом: 1,2,3 – соответственно номера прогрева бетона

Этот рост связан с разрыхлением камня вяжущего, т.к. происходит в результате обратимого модификационного превращения β -кварца в α -кварц при температуре $573\text{ }^{\circ}\text{C}$ [12].

При повторном нагреве кремнеземистые бетоны претерпевают, в основном, обратимые деформации вследствие перехода низкотемпературных

модификаций кремнезема в высокотемпературные и обратно. Наиболее существенное их расширение при нагреве и сокращение при охлаждении происходит в температурном интервале $20\text{-}400\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом коэффициент линейного температурного расширения бетонов, рассчитанный по данным рис. 3, составляет $21,7 \cdot 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. При температурах $600\text{-}900\text{ }^{\circ}\text{C}$

коэффициент линейного температурного расширения бетонов значительно ниже и составляет $2,3 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Результаты исследований показали, что разработанные алюмосиликатные бетоны с ШКП и кремнеземистые бетоны с

микрокремнеземом характеризуются низкими коэффициентами линейного температурного расширения. Это позволяет их эффективно использовать в огнеупорной отрасли.

Список литературы

1. Кононов, В.А. Производство огнеупорных материалов в России и перспективы его развития. Ч. 1. Структура и сырьевая база огнеупорных предприятий [Текст] / В.А. Кононов // Огнеупоры и техническая керамика. – 2001. – №12. – С. 30-41.
2. Сенников, С.Г. Состояние Российской металлургии и огнеупорной промышленности на рубеже третьего тысячелетия [Текст] / С.Г. Сенников, С.Н. Фокин // Огнеупоры и техническая керамика. – 2000. – № 1. – С. 49-56.
3. Хорошавин, Л.Б. Огнеупорная промышленность России и ее развитие [Текст] / Л.Б. Хорошавин. – Екатеринбург: ЦНТИ, 1998. – 52 с.
4. Аксельрод, Л.М. Огнеупорные бетоны нового поколения в производстве чугуна и стали [Текст] / Л.М. Аксельрод // Огнеупоры и техническая керамика. – 1999. – № 8. – С. 35-42.
5. Eguchi T., Takita J., Yoshito J. Et. Al. Low-cement-bonded castable refractories // Taikabutsu. Overseas. – 1989. – V.9. - №1. – P.10-25.
6. Пивинский, Ю.Е. Новые огнеупорные бетоны и вяжущие системы – основополагающее направление в разработке, производстве и применении огнеупоров в XXI веке. Ч. I. Тенденции развития, вяжущие системы [Текст] / Ю.Е. Пивинский // Огнеупоры и техническая керамика. – 1998. – № 2. – С.4-13.
7. Yuan S. Selfflowing castables with ultra-low cement-content // Interceram. – 1996. – V. 45. – № 4. – P.244, 246, 248.
8. Григорьев, П.Н. Растворимое стекло [Текст] / П.Н. Григорьев, В.И. Матвеев. – М.: Промстройиздат, 1989. – 97 с.
9. Химическая технология керамики и огнеупоров [Текст] / ред. П.П. Будников, Д.Н. Полубояринов. – М.: Стройиздат, 1972. – 552 с.
10. Стрелов, К.К. Теоретические основы технологии огнеупорных материалов [Текст] / К.К. Стрелов, И.Д. Кащеев. – М.: Металлургия, 1996. – 602 с.
11. Стрелов, К.К. Структура и свойства огнеупоров [Текст] / К.К. Стрелов. – М.: Металлургия, 1972. – 216 с.
12. Кайнарский, И.С. Динас [Текст] / И.С. Канарский. – М.: Металлургиздат, 1961. – 469 с.

Ключевые слова: огнеупорные бетоны, жидкое стекло, температурные деформации, микрокремнезем.

Аннотации

Наведено результати досліджень лінійних температурних деформацій алюмосилікатних і кремнеземистих вогнетривких бетонів на основі рідкого скла з добавками шамотно-каолінового пилу і мікрокремнезему. Встановлено, що розроблені модифіковані алюмосилікатні і кремнеземисті бетони характеризуються низькими коефіцієнтами лінійного температурного розширення.

Приведены результаты исследований линейных температурных деформаций алюмосиликатных и кремнеземистых огнеупорных бетонов на основе жидкого стекла с добавками шамотно-каолиновой пыли и микрокремнезема. Установлено, что разработанные модифицированные алюмосиликатные и кремнеземистые бетоны характеризуются низкими коэффициентами линейного температурного расширения.

The results of the research of linear thermal deformations of alumina-silicate and silica refractory concretes on the basis of liquid glass with additives of chamotte-kaolin dust and microsilica. It is established, that the developed modified alumina-silicate and silica concretes are characterized by low coefficients of linear thermal expansion.

УДК 691.544

Асн. С.Г. Нестеренко

S.G. Nesterenko

РОЗРОБЛЕННЯ ПОЛІМЕРЦЕМЕНТНОГО РОЗЧИНУ ОПТИМАЛЬНОГО СКЛАДУ

DEVELOPMENT POLYMERCEMENT MORTAR OPTIMAL COMPOSITION

Представив д-р хім. наук, професор А.М. Плуґін

Вступ. Стаття присвячена вирішенню проблеми використання полімерцементних розчинів для підвищення довговічності споруд залізничного транспорту, які експлуатуються в складних умовах дії струмів витоку й обводнення. Як сумісна з цементом полімерна в'язуча речовина розглядається карбамідно-формальдегідна смола, що має, як відомо, значну міцність при стисненні, розтягуванні і вигині і низьку електропровідність (великий електричний опір).

Проте використання карбамідної смоли у поєднанні з цементом зазвичай утруднене через нейтралізацію кислотного отверджувача лужним середовищем цементного тіста і каменю, що сильно гальмує схоплювання і тверднення розчину і може знизити його електроопір [1-3].

Експериментальні дослідження. У зв'язку з цим основним завданням досліджень була перевірка придатності карбамідної смоли для виготовлення полімерцементного розчину з необхідними характеристиками.

Для цього автором статті було виконане дослідження впливу кількості отверджувача на час твердіння смоли й електричний опір полімерцементного в'язучого.

Для перевірки дії отверджувача (щавелевої кислоти) на карбамідну смолу було проаналізовано дані ДНУЗТ із зміни часу схоплювання смоли від кількості отверджувача, (табл. 1). На рис. 1 за даними таблиці зображено графік залежності швидкості твердіння складу від вмісту отверджувача.

Дані про час схоплювання смоли КФМТ-50 з різним відсотковим вмістом отверджувача

№ п/п	Кількість отверджувача, %	Початок схоплювання, хв	Кінець схоплювання, хв
1	0,5	10	70
2	1	6	60
3	2	3	15
4	3	1	13
5	4	0,6	5
6	5	0,3	3

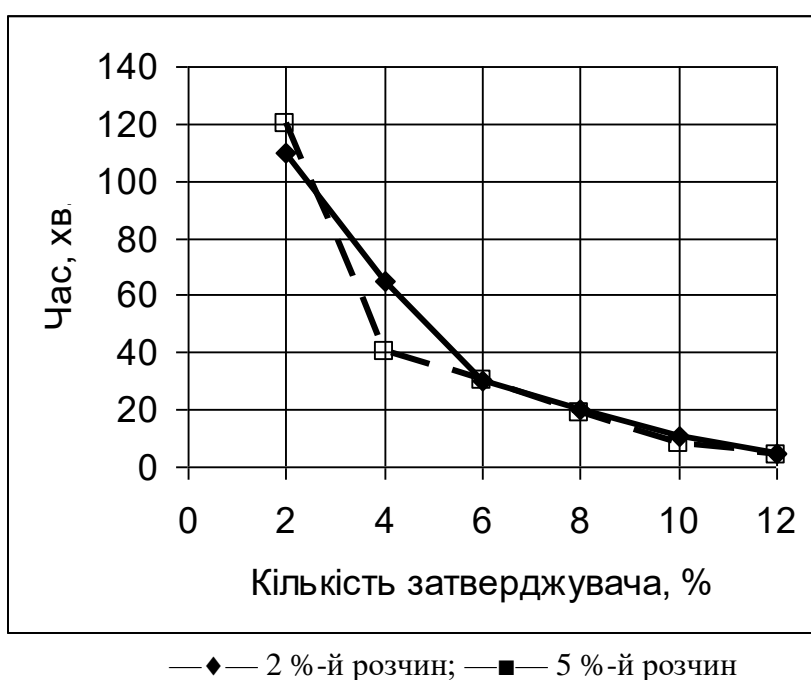


Рис. 1. Залежність часу твердіння складу від кількості отверджувача

Як показує графік, необхідна технологічний складу (час твердіння 80-40 хв) досягається при кількості отверджувача 3-5 %.

Визначення електричного опору і кінетики його зміни виконувалося за допомогою мультиметра з високим внутрішнім опором Sanwa – PC50 (рис. 2) на зразках 4x4x16 см з

карбамідоцементного в'язучого з різною кількістю отверджувача, зі звичайного цементно-піщаного розчину та полімерцементного розчину (з піском) оптимального складу.

Результати вимірювань електричного опору балочок подані в табл. 3, а також на графіках (рис. 3).



Рис. 2. Схема вимірювання електроопору за допомогою Sanwa – PC50

Таблиця 2

Дані з електричного опору балочок

№ балочки	Кількість затверджувача, %	R, кОм на постійному струмі		R, кОм на змінному струмі		Склад балочки	Дата забивання	Температура забивання, град.С
		по довжині	по ширині	по довжині	по ширині			
1	1	84	48	93	49	Розчинені КФМТ-50	10,10,12	17
2	1	99	64	101	67			
3	1	87	51	94	57		28,09,12	20
4	1	243	124	257	131			
5	1	75	48	79	44	Цементно-водні с КФМТ-50	01,10,12	20
6	2	94	57	97	59			
7	3	102	68	114	73		01,10,12	20
8	4	97	53	94	49			
9	5	69	41	67	50		01,10,12	20
10	6	99	61	103	64			
11	10	111	62	109	59		02,10,12	19
12	15	88	40	93	45			
13	20	91	59	94	63	Ц/В	02,10,12	19
14	0	26	13	25	12			
15	0	22	12	20	11	Ц/В+зола	02,10,12	19
16	0	68	29	69	31	Ц/В+пісок	02,10,12	19
17	0	14,5	3,8	14,7	3,6	ОС суха	24,08,12	23
18	0	5,6	0,6	5,4	0,7	ОС волога	24,08,12	23

Як бачимо, електричний опір балочок з карбамідною смолою значно вищий у порівнянні з балочками із звичайного цементного каменю і цементно-піщаного розчину як на постійному, так і змінному струмах. Оптимальною кількістю отверджувача (щавелева кислота) є 3 % (за сухою речовиною) від кількості смоли типу КФМТ-50.

Висновки і рекомендації

1. Виконані експериментальні дослідження підтвердили можливість виго-

товлення полімерцементних розчинів із карбамідною смолою з придатними технологічними властивостями та високим електричним опором.

2. Результати досліджень можуть бути використані для застосування карбамідно-формальдегідних розчинів з метою електрокорозійного захисту конструкцій з бетону, залізобетону та кам'яної кладки.

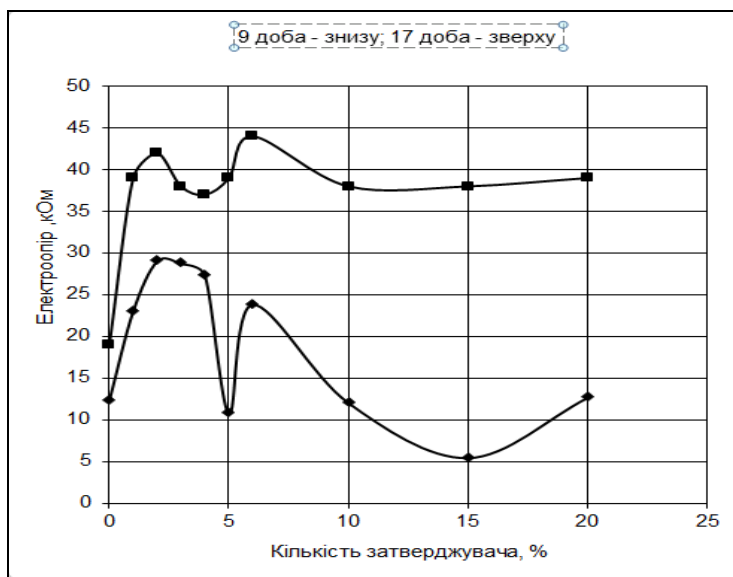


Рис. 3. Графік залежності електричного опору від кількості отверджувача на 9-ту, 17-ту добу після приготування

Список літератури

1. Характеристики карбамидоформальдегідных клеев [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.okleyah.ru/.../harakteristiki-karbamidoformaldegidnih-kleev.ph...
2. МФ-17, М-19-62. Отверждение карбамидных смол с одновременной полимеризацией [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.bibliotekar.ru/.../10.htm.
3. Цемент-Вам – Исследование изменений прочности бетона [Электронный ресурс]. – Режим доступа: cement-vam.ru/-Issledovanie_izmenenii_prochnosti_betona.htm.

Ключові слова: карбамідна смола, щавелева кислота, електроопір, час схоплювання, електрокорозія, захист.

Анотації

Робота присвячена проблемі використання полімерцементних розчинів для підвищення довговічності споруд залізничного транспорту, що експлуатуються в умовах дії струмів витікання та обводнення. Як сумісна з цементом полімерна в'язуча речовина розглядається карбамідно-формальдегідна смола, яка, як відомо, має значну міцність і великий електричний опір. Але, як відомо, використання карбамідної смоли у сполученні із цементом зустрічає великі труднощі, пов'язані з нейтралізацією кислотного отверджувача лужним середовищем цементного каменю, а тому із значною затримкою твердіння та можливим недостатнім опором.

У статті виконані експериментальні дослідження впливу кількості отверджувача на термін схоплювання смоли й електричний опір відповідного полімерцементного в'язучого. Виконані дослідження підтверили можливість виготовлення полімерцементних розчинів із карбамідною смолою для електрокорозійного захисту конструкцій з бетону, залізобетону та кам'яної кладки.

Работа посвящена проблеме использования полимерцементных растворов для повышения долговечности сооружений железнодорожного транспорта, эксплуатируемых в

условиях действия токов утечки и обводнения. В качестве совместного с цементом полимерного связующего рассматриваются карбамидно-формальдегидные смолы, которые, как известно, имеют значительную прочность и большое электрическое сопротивление. Но, как известно, использование карбамидной смолы в сочетании с цементом встречает большие трудности, связанные с нейтрализацией кислотного отвердителя щелочной средой цементного камня, а потому со значительной задержкой твердения и возможным недостаточным сопротивлением.

В статье выполнены экспериментальные исследования влияния количества отвердителя на срок схватывания смолы и электрическое сопротивление соответствующего полимерцементного вяжущего. Выполненные исследования подтвердили возможность изготовления полимерцементных растворов с карбамидной смолой для электрокоррозионной защиты конструкций из бетона, железобетона и каменной кладки.

The work is devoted to the use of polymer-solvent-ditch to improve the durability of the railway facilities of transport, operating in times of leakage currents and flooding. In the quality of the joint with cement polymer matrix is considered carbamide-formaldehyde resins, which are known to have significantly strength and high electrical resistance. But as now, using urea resin in combination with cement, encounters great difficulties associated with the neutralization of the acid alkaline medium hardening cement, and therefore significantly delayed hardening, and the possible lack of resistance.

The paper carried out experimental studies of the effect an amount of hardener to resin setting time and the electric resistance of the corresponding polymer-binder. Completed studies have confirmed the possibility of manufacturing polymer-solvent-ditch with urea resin to elektrokorrozionnoy protection structures made of concrete, reinforced concrete and masonry.

УДК 725

*Д-р архітектури В.П. Мироненко (ХНУСА),
кандидати техн. наук І.В. Подтележнікова,
О.С. Герасименко (УкрГАЗТ)*

*V.P. Myronenko,
I.V. Podtelezhnikova, O.S. Gerasimenko*

ОПТИМИЗАЦИЯ ОБЪЕМНО-ПЛАНИРОВОЧНЫХ РЕШЕНИЙ ПАССАЖИРСКОГО ЗДАНИЯ ВОКЗАЛА

OPTIMIZATION OF SPACE-PLANNING DECISIONS PASSENGER STATION BUILDING

Постановка проблемы. Железнодорожные перевозки обладают рядом преимуществ перед другими видами транспорта. По сравнению с авиа- и автоперевозками такими преимуществами являются: лучшая психологическая и

физическая переносимость, большая провозная способность, независимость от метеоусловий, сезона года и времени суток, а также для туристов преимуществом является возможность обзора местности. Железная дорога имеет потенциальные

возможности увеличить скорость доставки и комфорт обслуживания. В [1] определены основные направления развития железнодорожного транспорта: техническое переоснащение, увеличение пропускной способности, увеличение скорости движения поездов и т.д. – все это является значительной нагрузкой для пассажирских и технических зданий на железнодорожном транспорте. В Германии, Австрии, Франции, Бельгии, Великобритании, Японии модернизация вокзальных комплексов является инвестиционными проектами с прогнозируемыми сроками окупаемости. На сегодняшний день современные железнодорожные вокзалы трансформируются в сложные многофункциональные структуры с коммуникационной, общественной, торговой, развлекательной и другими функциями [2-6]. Кроме того, реконструкция зданий вокзалов с перепрофилированием в многофункциональные кооперированные комплексы (МКК) способствует развитию и экономическому росту города в целом [7].

Анализ последних исследований.

Вопросы проектирования и модернизации вокзальных комплексов изучались многими архитекторами в различных аспектах: Явейном И.Г., Муруновым А.Ю. Васильевым Е.В., Иконниковым Л.В., Батыревым В.М., Голубевым Г.Е., Херцегом К., Ле Корбюзье, Древаль И.В. Огромный вклад сделали действующие архитекторы, проекты которых успешно реализованы или находятся на стадии реализации: Явейн Н.И., М. фон Геркан, Ф. Марг, А. Виммер, Н. Гримшоу, С. Калатрава, а также многие другие ведущие архитекторы. В [8] приводится 10 признаков идеального вокзала: 1) современная архитектура; 2) памятники архитектуры; 3) скульптурные произведения; 4) мультимодальность; 5) рестораны и предприятия быстрого питания; 6) книжные магазины; 7) приспособления для людей с ограниченными возможностями; 8) фонтаны; 9) автостоянки; 10) сады. Несмотря на проделанную работу

предшественников критерии оптимальной организации пространства внутри здания вокзала с учетом европейских требований, на наш взгляд, четко не сформулированы. Во-первых, для определения задач проектирования необходимо четко описать современные требования к архитектуре вокзалов, во-вторых, не везде есть возможность устройства садов, учитывая климат и экономическую рентабельность в эксплуатации, в-третьих, автостоянки являются элементом системы внутреннего транспортного обслуживания города и заслуживают отдельного рассмотрения, так же как и скульптуры и памятники архитектуры. Все это говорит о том, что современные требования соответствия европейским стандартам еще четко не сформулированы несмотря на многочисленные ссылки на них [9], а в условиях нашей страны требуют некоторой коррекции. На сегодняшний день на территории Украины продолжается хаотичная локальная реконструкция без учета перспектив развития вокзального комплекса в целом и городской транспортной сети, в результате которой решаются только санитарные и частично эстетические вопросы. Не продуманные развязки перемещения различных категорий пассажиров и транспорта, слабая система общественного обслуживания ведет к ощущению дискомфорта от поездки и как следствие к упадку железнодорожной отрасли в целом.

Таким образом, при проектировании необходимо решить сложную задачу организации многоуровневой объемно-пространственной структуры, отвечающей современным требованиям. При этом необходимо учитывать перспективы развития и возможность трансформации такой структуры по мере замены технического оснащения с учетом экономической целесообразности и экологической безопасности.

Решение такого типа задач может быть реализовано путем применения системного подхода. Здание вокзала потенциально обладает свойствами

сложной системы, рассмотрение которой в различных аспектах позволит выявить алгоритм решения задач при проектировании и реконструкции.

Целью статьи является выявление системообразующих факторов системы «пассажирские здания вокзала» для последующего определения зависимости параметров системы от параметров окружающей среды, закономерностей и предпосылок развития. Такие исследования позволят создать базу для разработки программного обеспечения проектирования зданий вокзалов в различных условиях.

Изложение основного материала.

Выявление системообразующего фактора и анализ влияния окружающей среды являются предпосылками для описания здания вокзала в виде сложной многоуровневой системы МКК. Каждый системообразующий фактор (рис. 1) требует детального изучения и описания по отдельности, это позволит при последующих исследованиях определить процессы предоставления услуг исследуемой системой, ее вход и выход.

Социальный системообразующий фактор формирует первопричину образования данного типа здания, основан на потребности различных групп населения мигрировать, перемещаться и перевозить грузы на дальние и не очень расстояния для удовлетворения всевозрастающих с прогрессом потребностей. Все этапы развития вокзальных комплексов продиктованы антропогенным фактором, результатом чего является образование новых общественных транспортно-коммуникационных узлов, способных удовлетворить практически любые потребности, возникающие в процессе осуществления деловой или другой деятельности, требующей перемещения различных групп населения [10]. Примером являются: вокзал в Нагое (рис. 2); 16-этажный вокзальный комплекс в Киото (рис. 3); центральный вокзал Берлина (рис. 4) и другие современные вокзалы на стадии строительства. В такой сложной

структуре современного вокзала возникает потребность организовать безопасное и быстрое перемещение к конечной цели различных групп населения, в том числе маломобильных. Кроме того, этим объектам технического назначения также присуще некое романтизированное отношение, здесь происходят встречи и расставания, первое знакомство с культурой страны или города, это формирует эргономические требования к организации архитектурной среды и размещению дополнительных объектов, привлекательных для туристов.

Территориальный системообразующий фактор определяет востребованность направления перемещения с какой-либо целью. Анализ факторов различных градостроительных уровней влияния на условия формирования железнодорожных вокзальных комплексов приводятся в [2]. Объемно-пространственная структура самого здания вокзала будет напрямую зависеть от государственного значения объектов различного назначения, расположенных в городе, и их привлекательности для различных групп населения. Возможность осуществления различных видов общественно-деловой или культурно-развлекательной деятельности в населенном пункте будет определять наличие учреждений дополнительного обслуживания в МКК. Климатические особенности района размещения, кроме объемно-планировочного и конструктивного решений, будут определять также характер и площадь озеленения, площадь и структуру рекреационной зоны. Территориальный фактор также определяет привлекательность объекта для специалистов и инвесторов, возможность применения тех или иных энергоэффективных, биопозитивных технологий. Важно определить перспективное направление развития региона, увеличение пропускной способности и размеры требуемых площадей помещений вокзала в зависимости от его типа, ранга и размещения в зональной и транспортной структурах.

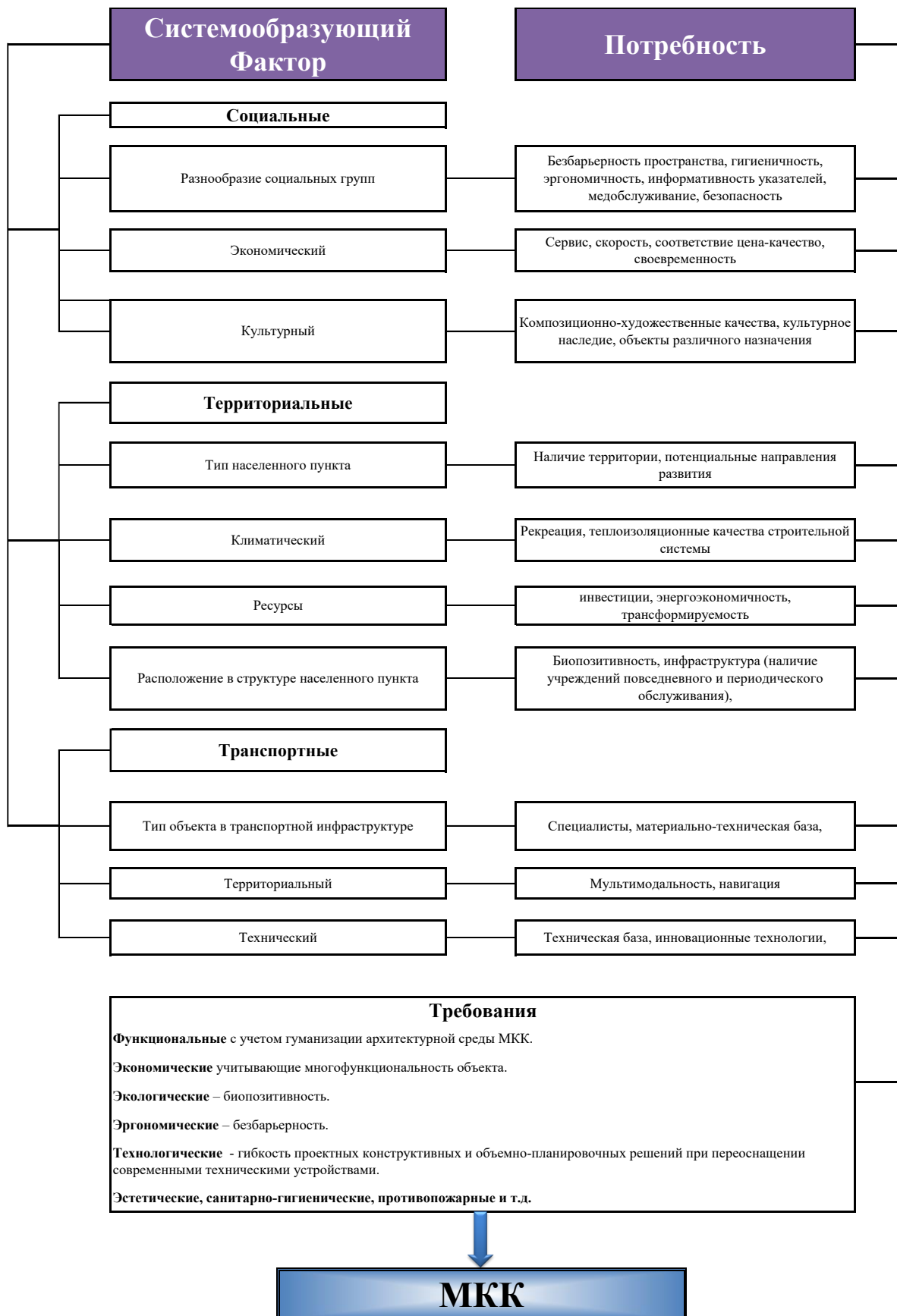


Рис. 1. Иерархия системообразующих факторов



Рис. 2. Вокзал в Нагое



Рис. 3. Вокзал в Киото



Рис. 4. Вокзал Берлин Центральный

Транспортный фактор определяет сочетание видов транспорта, пересекающихся в транспортном узле. Наиболее перспективным направлением является мультимодальность – сочетание железнодорожного, авто- и авиатранспорта с внутренним городским авто-, вело- и

электротранспортом. Этим фактором определяется наличие технического оснащения и реконструкция тупиковых вокзалов в русловые с размещением здания или над транспортными коммуникациями и платформами или под ними. Также технологические требования должны

учитывать гибкость проектных решений, возможность увеличения площади или этажности, размещение современного оборудования с учетом перспективного развития МКК.

При разработке объемно-планировочных решений, учитывая системообразующие факторы, помещения будут размещаться по группам, ориентируясь на потребителя данного вида услуг. Поэтому группировка помещений по А.Л. Гельфонд [11] применима при проверке необходимого минимального состава помещений. При представлении здания служебно-технического назначения как многоуровневой системы необходимо представлять группы помещений по принципу структурной упорядоченности с иерархией подтипов. Для этого необходимо определить элементы такой системы, как МКК, ее связи и иерархию. Определяя иерархию, определяем подсистему с системообразующей функцией, которая оказывает направляющее воздействие на нижележащий уровень. Это воздействие проявляется в том, что подчиненные члены иерархии приобретают новые свойства, отсутствовавшие у них в изолированном состоянии. А в результате появления этих новых свойств формируется новый, другой «облик целого» (влияние свойств элементов на целое). Возникшее таким

образом новое целое приобретает способность осуществлять новые функции.

Вывод. Пассажирыские здания находятся постоянно в состоянии эволюции. Это продиктовано постоянным изменением и расширением их функций. Меняется и пространственная структура с развитием транспортной сети, изменением технологических процессов, увеличением грузо- и пассажиропотоков. Проектные решения должны быть универсальными с учетом перспективы развития и увеличения площадей многофункционального использования. Многоуровневые локальные развязки движения людских потоков на практике будут комфортны в случае размещения в том же уровне места посадки-высадки на следующий вид транспорта. Кроме того, мировой опыт показывает, что такие транспортно-пересадочные узлы лучше размещать с коммуникационной связью с центром города и аэропортом, что требует проектирования мероприятий по шумо- и экозащите селитебных территорий. Представление таких объектов в виде систем требует более точного описания элементов системы и их взаимосвязи между собой и окружающей средой, что и является перспективным направлением дальнейших исследований.

Список литературы

1. Розпорядження Кабінету міністрів України від 16 грудня 2009 р. № 1555-р «Про схвалення Стратегії розвитку залізничного транспорту на період до 2020 року [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/1555-2009-p>.
2. Древаль, І.В. Чинники формування і розвитку залізничних вокзальних комплексів [Текст] / І.В. Древаль // Коммунальное хозяйство городов: науч.-техн. сб. – К.: Техніка, 2011. – Вып. 99 – С. 384-389.
3. Хайруллина, Ю.С. Исторический обзор отечественного опыта формирования городских узловых объектов железнодорожной инфраструктуры [Электронный ресурс] // Архитектон: известия вузов. – 2012. – № 40. – Режим доступа: http://archvuz.ru/2012_4/12.
4. Мурунов, А.Ю. Принципы архитектурной модернизации железнодорожных вокзальных комплексов на современном этапе для крупных и крупнейших городов [Текст]: дис. ... канд. арх. / А.Ю. Мурунов. – Н. Новгород, 2005. – 188 с.

5. Мироненко, В.П. Архитектура современных железнодорожных вокзальных комплексов. Модернизация вокзалов и тенденция развития ЖВК [Текст] / В.П. Мироненко // Вісник ХДАМГ. – Харків: ХДАМГ, 2006. – Вип. 7. – С. 18-21.

6. Голубка, М.М. Проблемы реконструкции вокзальных комплексов в условиях развития города [Электронный ресурс] // Науковий вісник будівництва. – 2010. – Режим доступа: http://archive.nbuv.gov.ua/portal/natural/Nvb/2010_59/index.htm.

7. Рекомендации по проектированию общественно-транспортных центров (узлов) в крупных городах [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/5/5007/index.php

8. Лучшие вокзалы мира [Электронный ресурс]. Т. 1. / М.Ю. Грудинин, А.Э. Ерзовский, И.А. Колесов [и др.]. – Режим доступа: http://enter.giprogor.ru/files/Best_stations_around_the_world_Vol1.pdf/

9. Демьянович, И.В. Управление качеством транспортных услуг в контексте достижения стратегических целей [Электронный ресурс] // Проблемы современной экономики. – 2010. – № 4. – Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-kachestvom-transportnyh-uslug-v-kontekste-dostizheniya-strategicheskikh-tseley>

10. Тімохін, В. Топологія транспортних ландшафтів антропогенних геохорів: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.nbuv.gov.ua/portal/natural/dprmu/2011_21/2_Timohin.pdf

11. Гельфонд, А.Л. Архитектурное проектирование общественных зданий и сооружений [Текст]: учеб. пособие / А.Л. Гельфонд. – М.: Архитектура-С, 2006. – 280 с.

Ключевые слова: модернизация, пассажирское здание вокзала.

Аннотации

Розглянуто тенденції модернізації об'ємно-планувального рішення пасажирської будівлі вокзалу на підставі європейського досвіду. Для ухвалення оптимального рішення об'ємно-планувальної організації простору будівлі вокзалу запропоновано її розглядати як багатофункціональний кооперований комплекс. Визначені передумови й системотвірні фактори для подання даного типу будівель у вигляді складної багаторівневої системи.

Рассмотрены тенденции модернизации объемно-планировочного решения пассажирского здания вокзала на основании европейского опыта. Для принятия оптимального решения объемно-планировочной организации пространства здания вокзала предложено его рассматривать как многофункциональный кооперированный комплекс. Определены предпосылки и системообразующие факторы для представления данного типа здания в виде сложной многоуровневой системы.

This article examines trends in the modernization of the space-planning solutions passenger station building on the basis of European experience. For optimal decision making body-planning organization building space station asked to consider it as a multifunctional complex co-operative. Preconditions and system factors to provide this type of building in the form of a complex multi-level system.

УДК: 656.212:656.225

Канд. техн. наук Н.В. Кондусова

N.V. Kondusova

ВОПРОСЫ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАРЕЗАНИЯ ДВУХПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

BUSINESS SOFTWARE TOOL CUTTING TWO-PARAMETER GEARS

Представил д-р техн. наук, профессор Н.В. Везуб

Постановка проблематики в общем виде, ее связь с важными научными и практическими заданиями. Современное машиностроение, в том числе ее отрасли “Машины для производства строительных материалов и конструкций”, “Машины для дорожных работ”, “Подъемно-транспортные машины” и т. д., требует, с одной стороны, создания машин и механизмов с расширенными функциональными возможностями, а с другой – предъявляет к ним все более жесткие требования по весогабаритным характеристикам.

Срединное положение передачи в структуре практически любой машины определяет ее центральную роль и, следовательно, тесную взаимосвязь, с одной стороны, с двигателем, а с другой – с исполнительным механизмом, что в конечном итоге формирует выходные показатели всей машины в целом. Развитие зубчатых зацеплений в настоящее время характеризуется двумя направлениями: совершенствованием традиционных и созданием новых типов и видов передач.

Существующие традиционные зубчатые передачи не всегда позволяют синтезировать простые и надежные регулируемые приводы, так как по своей геометрической природе являются однопараметрическими и не имеют

возможности осуществлять регулирование по нескольким параметрам.

Поэтому возникла проблема создания регулируемых зубчатых зацеплений, которые могли бы не только осуществлять непрерывную передачу крутящего момента, но и одновременно изменять другие параметры, например, межцентровое расстояние, углы скрещивания, передаточные отношения, и иметь сравнимые с традиционными приводами габариты и массу, оставаясь технологичными и надежными в эксплуатации.

Значительный прогресс в области разработки и создания таких регулируемых зубчатых передач был достигнут благодаря работам В.Р. Ковалюха, в которых он доказал возможность регулирования параметров в высшей кинематической паре благодаря использованию нового класса двухпараметрических зацеплений [1-3].

Анализ последних исследований и публикаций. В последние годы в Украине появились новые теоретические и практические возможности для изучения формообразования специальных зубчатых колес. Благодаря применению и развитию многопараметрических отображений пространства созданы алгоритмы совместного геометрического проектирования зубчатых колес, зубообрабатывающих инструментов и

формообразования в неразрывной взаимосвязи в единой инструментальной системе. Многозвенные инструментальные системы описаны обобщенной структурой отображений и систематизацией отдельных структур, которая охватывает однопараметрические и двухпараметрические рабочие и станочные зубчатые зацепления с разными сочетаниями сопряженных профилей, начальных поверхностей, кинематики, взаимного расположения колёс [4, 5]. В Украине на базе НТУ "Харьковский политехнический институт" и ЗАО "Конструкторско-технологическое бюро верификационного моделирования и подготовки производства" в 2001 году создан учебно-научно-производственный центр интегрированных технологий ускоренного изготовления прототипов, инструментального обеспечения и производства изделий Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufacturing (RPTM) [6].

Цель исследования: усовершенствовать процессы формообразования зубчатых колёс с постоянным нормальным шагом для специальных двухпараметрических зацеплений.

Основная часть. В результате проведенных исследований предлагается ряд новых методов формообразования и обкаточных инструментов для предварительной обработки – обкаточные лезвийные инструменты (резцы для зуботочения) [7], и для окончательной обработки – среди них это шеверы, зубчатые хоны и режуще-деформирующие обкатники с точечным контактом.

Опишем обкаточные инструменты для обработки, например, сферических зубчатых колёс с постоянным нормальным шагом, полученные на основе цилиндрического производящего колеса с точечным контактом. Это колесо скрещивается с обрабатываемым сферическим колесом и, обкатываясь по

нему, перемещается вдоль его зубьев. Такая кинематика характерна для процесса шевингования. Применимость этого процесса к сферическим зубчатым колесам можно доказать наличием продольного (бреющего) скольжения зубьев. Известно, что скорость продольного скольжения зубьев $\bar{V}_{ск}$ направлена по касательной к линии зуба на начальной поверхности [8].

Скорость вращения обрабатываемого сферического колеса вокруг своей оси \bar{V}_1 в точке P_0 касания начальных поверхностей раскладывается на скорость \bar{V}_1' и скорость скольжения $\bar{V}_{ск1}$ (рис. 1).

Скорость \bar{V}_1' по величине и направлению равна скорости \bar{V}_2 вращения точки P_0 вместе с цилиндрическим производящим колесом (будущим шевером) вокруг его оси с параметром φ_2 . Дифференцируя уравнения движения по параметрам φ_1 и φ_2 , получаем проекции \bar{V}_1 и \bar{V}_2 на оси координат:

$$\begin{aligned} V_{1x_1} &= -x_{01} \sin \varphi_1 - y_{01} \cos \varphi_1; \\ V_{1y_1} &= x_{01} \cos \varphi_1 - y_{01} \sin \varphi_1; \\ V_{1z_1} &= 0; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} V_{2x_1} &= -x_{02} \sin \varphi_2 - y_{02} \cos \varphi_2; \\ V_{2y_1} &= x_{02} \cos \varphi_2 - y_{02} \sin \varphi_2; \\ V_{2z_1} &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где x_{01}, y_{01}, z_{01} – координаты точки P_0 в системе координат сферического колеса;

x_{02}, y_{02}, z_{02} – координаты точки P_0 в системе координат цилиндрического колеса.

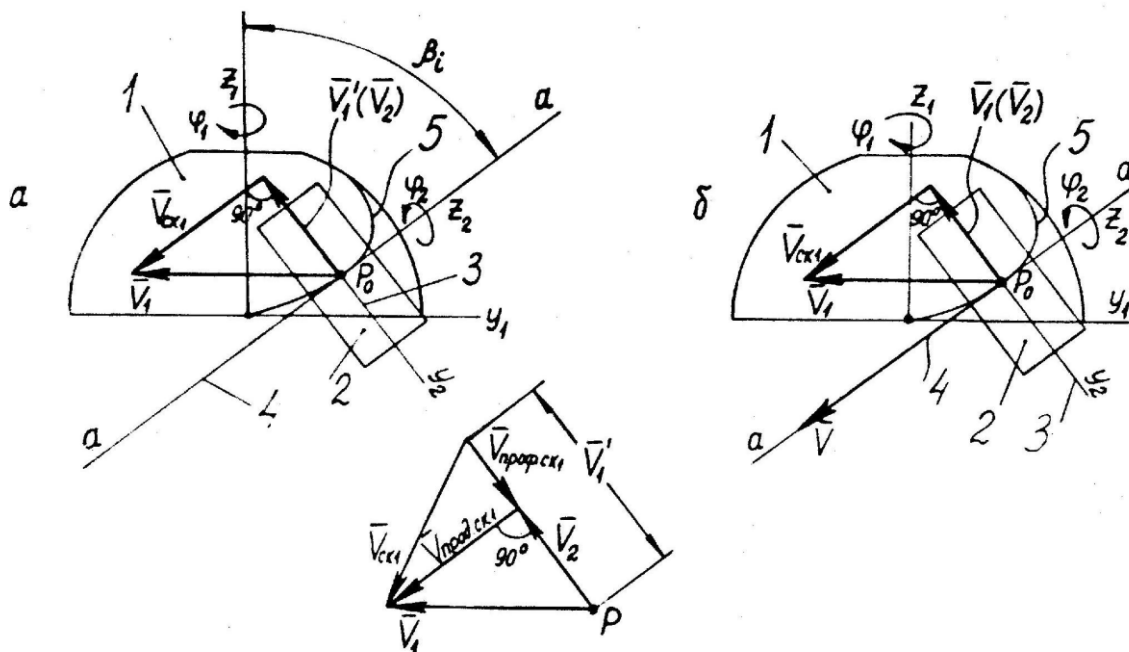


Рис. 1. Доказательство наличия скольжения поверхностей зубьев шевера и обрабатываемого сферического колеса:

- 1 – начальная сфера обрабатываемого колеса; 2 – начальный цилиндр шевера;
- 3 – нормаль к линии зуба обрабатываемого колеса; 4 – касательная к линии зуба;
- 5 – линия зуба

Переведем \bar{V}_2 из системы координат $x_2y_2z_2$ в систему $x_1y_1z_1$, то есть получив \bar{V}_1' , можем найти вектор скорости продольного скольжения поверхности зуба сфери-

ческого колеса по зубу цилиндрического $\bar{V}_{ск1}$ как разность $\bar{V}_1 - \bar{V}_1'$:

$$\begin{aligned} V_{ск1x_1} &= -x_{01} \sin \varphi_1 - y_{01} \cos \varphi_1 + i(x_{02} \sin \varphi_2 + y_{02} \cos \varphi_2); \\ V_{ск1y_1} &= x_{01} \cos \varphi_1 - y_{01} \sin \varphi_1 - i \cos \beta (x_{02} \cos \varphi_2 - y_{02} \sin \varphi_2); \\ V_{ск1z_1} &= -i \sin \beta (x_{02} \cos \varphi_2 - y_{02} \sin \varphi_2). \end{aligned} \quad (3)$$

Заметим, что формулы (3) относятся к линии зуба на начальной сфере и, следовательно, характеризуют именно скорость продольного скольжения при отсутствии составляющей профильного скольжения. На других эквидистантных линиях зуба, расположенных выше или ниже начальной сферы, в момент контакта сопрягаемых поверхностей имеются две составляющих скорости скольжения $\bar{V}_{ск1}$:

продольное $\bar{V}_{прод.ск.1}$ (вдоль линии зуба) и профильное $\bar{V}_{проф.ск.1}$ (по нормали к линии зуба). Ранее было доказано, что вращение с параметрами $\psi_1, \psi_2, \beta_{дон}$ в их взаимосвязи сводятся к мгновенному перемещению (скольжению) звеньев вдоль касательной к линии зуба \bar{K} со скоростью \bar{V} . Тогда исходя из этого факта можно констатировать, что к суммарному

мгновенному винтовому движению звеньев относительно касательной \bar{K} добавляется еще одно скольжение \bar{V} . Таким образом, доказано наличие скоростей взаимного скольжения сопрягаемых поверхностей, следовательно, шевингование сферических зубчатых колес с постоянным нормальным

шагом возможно. Режущие кромки шевера 1 получают как линии пересечения производящей поверхности 2 с передней поверхностью стружечных канавок (рис. 2). Угол наклона стружечных канавок нужно выбирать исходя из направления суммарной скорости скольжения.

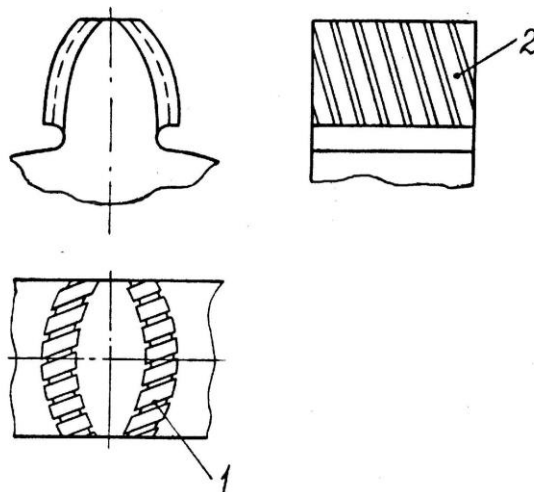


Рис. 2. Зуб шевера для обработки сферического колеса

Очевидно, что наличие скольжения зубьев позволяет рекомендовать также абразивное и алмазное хонингование зубьев сферических колес [9]. На рис. 3 показан, например, чертеж алмазного эластичного зубчатого хона с модулем 7 мм и числом зубьев 31 для отделочной обработки зубьев закаленных зубчатых колес.

Конструкция основана на предложениях и рекомендациях Института сверхтвердых материалов (ИСМ, Киев). Зубчатый венец имеет эластичный слой 1 из упругого материала. На боковых поверхностях бочкообразных зубьев имеется алмазоносный слой 2 толщиной от 0,8 до 1,5 мм. Зернистость, концентрация алмазов и связка назначаются в зависимости от обрабатываемого материала. В ИСМ освоена прогрессивная технология изготовления таких хонов для цилиндрических колес. По данным этого

института они обеспечивают шероховатость в диапазоне $R_a=0,8-0,2$ мкм. По сравнению с абразивными зубчатыми хонами на эпоксидных связках алмазные эластичные хоны могут обработать в 10 раз больше колес при равном объеме изношенного слоя (до 2-6 тыс. колес средних модулей).

Цилиндрическое производящее колесо с точечным контактом также может быть превращено в деформирующий обкатник. Причем его зубья будут состоять из трех частей: заборной 1, калибрующей 2 и предохранительной 3 (рис. 4). Благодаря наличию заборного участка с углом конуса δ производится поверхностное упрочнение обрабатываемых зубьев. Формообразующей является поверхность калибрующего участка. В отличие от обкатника ИСМ, формообразующая поверхность является фасонной поверхностью вращения с радиусом $R_{кр}$, геометрически не отличаю-

щаяся от поверхности бочкообразного зуба, сопрягаемого со сферическим цилиндрическим зубчатым колесом. Плоскость симметрии калибрующего участка, отстоящая от торца на расстоянии b , должна во время обработки совпадать с касательной к линии нормальных шагов сферического колеса. Значения параметров

b , c и δ определяют условия поверхностного деформирования. Процесс калибровки обкатниками (в том числе и твердосплавными) может повысить на одну степень точность зубчатых колес и уменьшить шероховатость обрабатываемой поверхности.

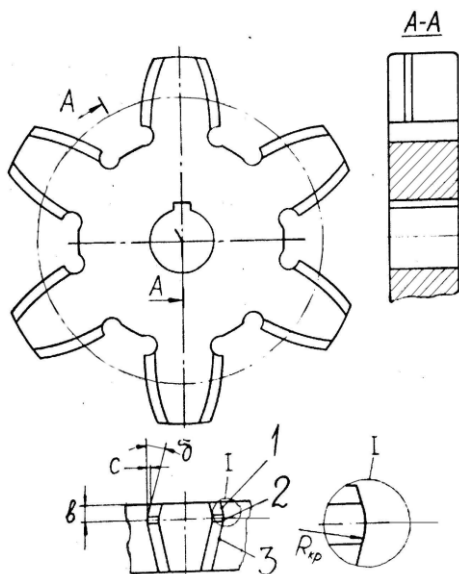


Рис. 3. Рабочий чертеж алмазного эластичного хона для окончательной обработки сферического зубчатого колеса с постоянным нормальным шагом

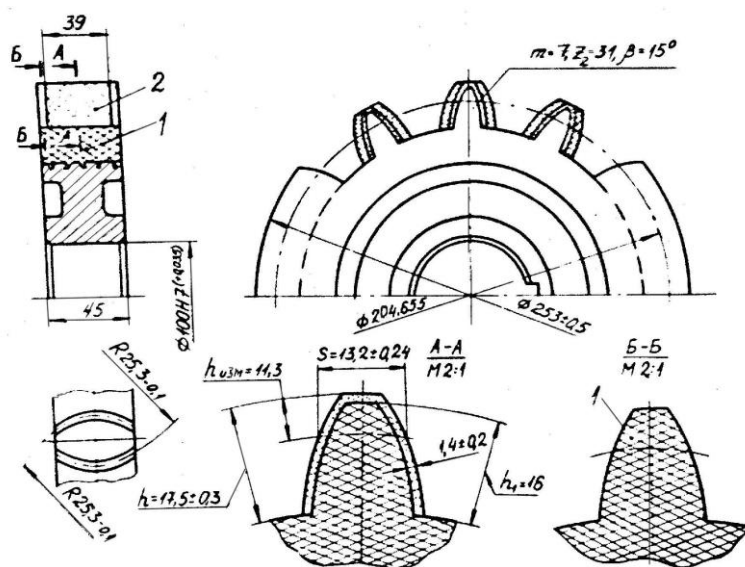


Рис. 4. Инструмент для калибровки сферических зубчатых колес

Если каждый зуб описанного инструмента снабдить с торца со стороны заборной части передней поверхностью, можно получить режуще-деформирующий обкатчик и тем самым добиться увеличения производительности за счет совмещения операций. Кроме того, при определенном соотношении между длиной заборного участка и величиной пропуска под поверхностное деформирование повышается точность формообразования и долговечность обработанных колес.

Общим свойством всех описанных инструментов является то, что они основаны на производящей поверхности, совпадающей с рабочей поверхностью цилиндрического колеса, сопрягаемого со

сферическим [10-12]. Другими словами, здесь использован принцип совпадения станочного и рабочего зацеплений. Поэтому предлагаемые инструменты - шевер, абразивный хон и обкатники - могут быть рекомендованы для окончательной обработки.

На базе цилиндрического производящего колеса можно спроектировать многозубый лезвийный обкаточный инструмент для предварительного нарезания сферических зубчатых колес с постоянным нормальным шагом (рис. 5). Применительно к традиционным цилиндрическим колесам такой инструмент называют обкаточным резцом для зуботочения [13].

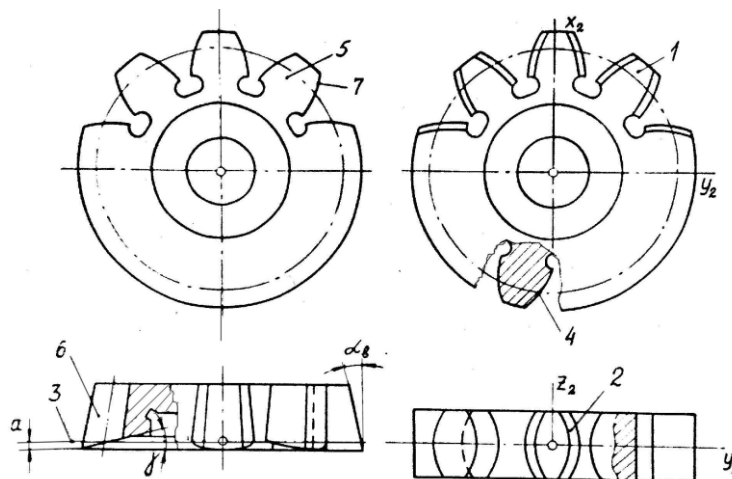


Рис. 5. Производящее цилиндрическое колесо и обкаточный лезвийный инструмент на его основе

Зоны наибольшей вероятности распределения точек контакта сопрягаемых поверхностей цилиндрического и сферического зубчатых колес находятся вблизи нормального сечения плоскостью 3, проходящей через межцентровую прямую. В связи с этим наиболее целесообразной представляется следующая методика профилирования указанного лезвийного обкаточного инструмента:

а) производящая поверхность (например, поверхность вращения 2,

ограничивающая бочкообразный зуб 1) считается заданной; в качестве основы для профилирования используется исходный профиль производящей поверхности 4 в нормальном сечении 3 (эвольвента, окружность или другая заданная кривая);

б) винтовым движением исходного профиля образуется винтовая боковая задняя поверхность зуба инструмента 6;

в) в пересечении задней поверхности с конической передней поверхностью 5 получается фасонная режущая кромка 7.

Если исходный профиль с параметром ζ задать уравнениями

$$\begin{aligned} x_0 &= f_1(\zeta); \\ y_0 &= f_2(\zeta); \\ z_0 &= f_3(\zeta), \end{aligned} \quad (4)$$

или

$$\begin{aligned} x_2 &= x_0 \cos \theta' - y_0 \sin \theta'; \\ y_2 &= x_0 \sin \theta' + y_0 \cos \theta'; \\ z_2 &= z_0 + p \theta', \end{aligned} \quad (6)$$

то уравнения винтовой задней поверхности с параметрами ζ, θ' в системе координат инструмента будут иметь вид (рис. 6):

$$\begin{aligned} x_2 &= f_1(\zeta) \cos \theta' - f_2(\zeta) \sin \theta'; \\ y_2 &= f_1(\zeta) \sin \theta' + f_2(\zeta) \cos \theta'; \\ z_2 &= f_3(\zeta) + p \theta', \end{aligned} \quad (5)$$

где θ' – текущий угол поворота исходного профиля;

p – параметр винта;

x_0, y_0, z_0 – координаты точек исходного профиля.

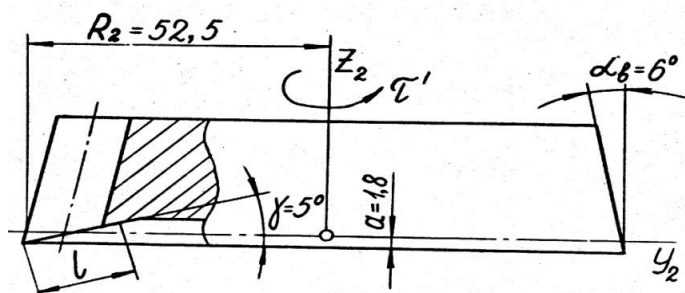


Рис. 6. Схема получения задней поверхности

Переднюю коническую поверхность с параметрами τ', l' в той же системе координат можно получить вращением образующей (рис. 7):

$$\begin{aligned} x_2 &= (R_2 + atg\alpha_e) \sin \tau' - l' \cos \gamma \sin \tau'; \\ y_2 &= -(R_2 + atg\alpha_e) \cos \tau' + l' \cos \gamma \cos \tau'; \\ z_2 &= -a + l' \sin \gamma, \end{aligned} \quad (7)$$

где l' – текущая длина образующей конуса;
 τ' – текущий угол поворота образующей;

a – расстояние от нормального сечения до торцевой плоскости, проходящей через наиболее удаленную от оси точку режущей кромки;

γ – передний угол.

Решая совместно уравнения (6) и (7), получаем связи между параметрами, которые будут удовлетворять точкам режущей кромки:

$$\begin{aligned} \theta' &= \frac{(\sqrt{x_0^2 + y_0^2} - R_2 - atg\alpha_e) \gamma + z_0 + A}{p}; \\ l' &= \frac{R_2 + atg\alpha_e - \sqrt{x_0^2 + y_0^2}}{\cos \gamma}; \\ \tau' &= \arcsin \frac{x_0 \cos \theta' - y_0 \sin \theta'}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}}. \end{aligned} \quad (8)$$

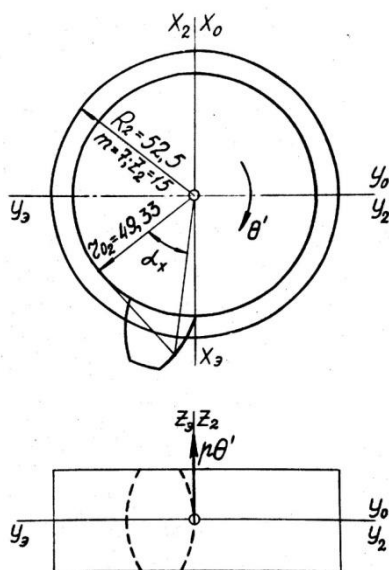


Рис. 7. К выводу уравнений передней поверхности точек фасонной режущей кромки в системе координат $x_2 y_2 z_2$

Профилирование может быть выполнено по следующему алгоритму:

- задавшись массивом значений параметра исходного профиля ζ , по уравнениям (4) получаем исходные координаты точек этого профиля x_0, y_0, z_0 , каждой из которых соответствует конкретная винтовая линия задней поверхности;

- подставляя эти координаты и постоянные параметры $R_2, a, p, \alpha_\theta, \gamma$ в формулу (8), подсчитываем значения угла θ' , соответствующие пересечению каждой из указанных винтовых линий с передней поверхностью;

- подставляя θ' и x_0, y_0, z_0 в уравнения (6), получаем искомые координаты.

Рассмотрим конкретный пример расчета. Пусть производящее цилиндрическое колесо с эвольвентным профилем имеет следующие исходные данные: модуль $m = 7$ мм; число зубьев $z_2 = 15$; радиус делительной окружности $R_2 = 52,5$ мм; радиус основной окружности

$r_{02} = 49,334$ мм; угол зацепления $\alpha = 30^\circ$. Зададим передний угол $\gamma = 5^\circ$; задний угол на вершине $\alpha_\theta = 6^\circ$.

Исходным профилем в данном случае является эвольвента с параметром α_x , и уравнения (4) в системе координат x_3, y_3, z_3 имеют следующий конкретный вид:

$$\begin{aligned} x_3 &= \frac{r_{02}}{\cos \alpha_x} \cos(\operatorname{tg} \alpha_x - \alpha_x); \\ y_3 &= \frac{r_{02}}{\cos \alpha_x} \sin(\operatorname{tg} \alpha_x - \alpha_x); \\ z_3 &= 0; \end{aligned} \quad (9)$$

в системе $x_0 y_0 z_0$

$$\begin{aligned} x_0 = x_2 &= -\frac{r_{02}}{\cos \alpha_x} \cos(\operatorname{tg} \alpha_x - \alpha_x); \\ y_0 = y_2 &= -\frac{r_{02}}{\cos \alpha_x} \sin(\operatorname{tg} \alpha_x - \alpha_x); \\ z_0 = z_2 &= 0; \end{aligned} \quad (10)$$

Расчет шага и параметра винта выполнен по известным рекомендациям [14]:

$$P = \frac{2\pi R_2}{\operatorname{tg} \alpha_0 \operatorname{tg} \alpha} = 8612,721 \text{ мм};$$

$$p = \frac{P}{2\pi} = 1370,757 \text{ мм}.$$

Направление винтовой поверхности для разноименных боковых сторон профиля (правое или левое) учитывалось знаками угла θ' и расстояния a . Положительными приняты значения θ' , соответствующие вращению против часовой стрелки, если смотреть с конца оси

z_2 . Значение величины параметра a учитывается со знаком плюс, если режущая кромка расположена по z_2 ниже, чем исходный профиль. Исходные координаты профиля, подсчитанные по уравнениям (9), и результаты аналитического профилирования представлены в таблице и на рис. 8.

Анализ результатов расчета показал, что боковая сторона 2 режущей кромки смещена относительно соответствующей стороны 1 исходного профиля вокруг и вдоль оси инструмента. Знаки углового и линейного смещений соответствуют правому винту, заложенному в расчет, что подтверждает правильность используемых уравнений и методики профилирования.

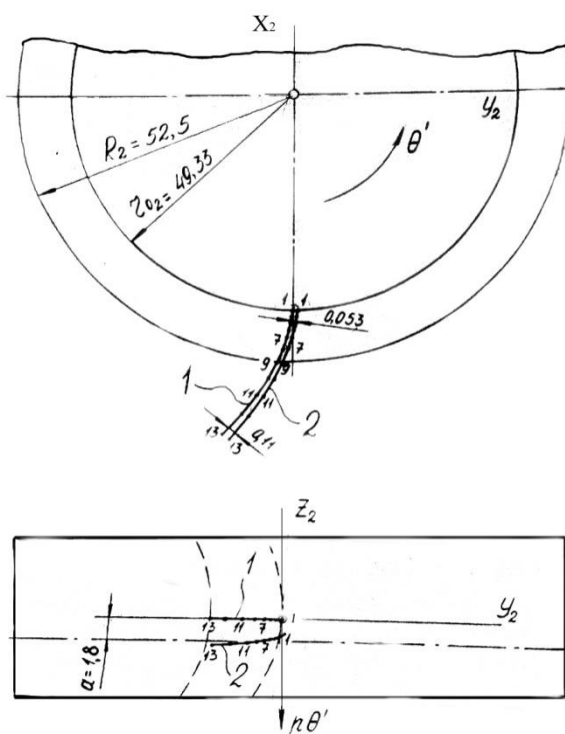


Рис. 8. Результаты профилирования конкретного инструмента

Профиль режущей кромки нового инструмента имеет большую ширину по сравнению с исходным профилем. Из-за большой величины шага винта по сравнению с расстоянием между исходным профилем и режущей кромкой текущий

угол θ' очень мал. Поэтому различия между исходным профилем и режущей кромкой незначительны: по высоте 0,0227 мм, по ширине от 0,106 мм на ножке зуба до 0,22 мм на головке (см. таблицу). По мере переточки инструмента эти

различия будут уменьшаться, достигнув нуля в нормальном сечении, а при дальнейших переточках вновь возрастать с обратным знаком, так что при достижении

$a = -1,8$ мм ширина профиля режущей кромки предельно переточенного инструмента будет меньше ширины исходного профиля [15].

Таблица

Результаты расчета координат точек фасонной режущей кромки

Номер точки профиля	Значение параметра эвольвенты α_x , град	Координаты точек исходного профиля, мм			Текущее значение θ' , рад	Координаты точек фасонной режущей кромки, мм		
		x_0	y_0	z_0		x_0	y_0	z_0
1	0	-49,3342	0	0	-0,001069	-49,3339	+0,0527	-1,4654
2	3	-49,4020	-0,0024	0	-0,001073	-49,4019	+0,0506	-1,4710
3	6	-49,6061	-0,0190	0	-0,001086	-49,6059	+0,0349	-1,4895
4	9	-49,9492	-0,0653	0	-0,001108	-49,9490	-0,0096	-1,5198
5	12	-50,4361	-0,1571	0	-0,001139	-50,4361	-0,096	-1,5614
6	15	-51,0744	-0,3114	0	-0,001180	-51,0743	-0,2541	-1,6177
7	18	-51,8701	-0,5582	0	-0,001231	-51,8706	-0,4943	-1,6874
8	21	-52,9842	-0,9160	0	-0,001293	-52,8371	-0,8482	-1,7727
9	24	-53,9843	-1,4230	0	-0,001367	-53,9862	-1,3498	-1,8742
10	27	-55,3282	-2,1191	0	-0,001454	-55,3310	-2,0382	-1,9930
11	30	-56,8841	-3,0602	0	-0,001556	-56,8892	-2,9715	-2,1335
12	33	-58,6650	-4,3174	0	-0,0017	-58,6720	-4,2193	-2,2454
13	36	-60,6871	-5,9803	0	-0,0018	-60,6972	-5,8702	-2,4843

Таким образом, фасонная режущая кромка не лежит на поверхности бочкообразного зуба производящего колеса в течение почти всего срока службы инструмента и отличается от теоретического профиля зуба в нормальном сечении. Это сказывается на геометрической точности формообразования. Поэтому такие многозубые обкаточные лезвийные инструменты можно рекомендовать только для предварительной обработки сферических колес.

Выводы и перспективы дальнейшего развития в данном направлении. Применение описанных и рекомендуемых методов формообразования, конструкций режущих и деформирующих инструментов и методики их проектирования могут перевести вопросы использования двухпараметрических зубчатых колес с постоянным нормальным шагом в реальную плоскость.

Теоретические результаты работы обеспечивают полный набор информации, необходимой для практической реализации процессов формообразования зубчатых колес с эквидистантными зубьями.

Список литературы

1. Ковалюх, В.Р. Двухпараметрические колёса с равновысокоширокими зубьями и впадинами [Текст] / В.Р. Ковалюх // Машиностроение. – 1982. – № 1. – С. 43-45.

2. Ковалюх, В.Р. Новый способ регулирования скорости вращения зубчатой передачи и синтез на его основе зубчатых вариаторов [Текст] / В.Р. Ковалюх, Р.В. Ковалюх // Теория механизмов и машин. – Харьков, 1988. – Вып. 44. – С. – 107-112.
3. Ковалюх, В.Р. Синтез зубчатых вариаторов на основе колёс с равновысокоширокими зубьями и впадинами [Текст]: дис.... канд. техн. наук / В.Р. Ковалюх. – Харьков, 1982. – 156 с.
4. Кривошея, А.В. Особенности совместного геометрического проектирования зубчатых колёс и зубообрабатывающих инструментов [Текст] / А.В. Кривошея // Труды междунар. конф. «Высокие технологии в машиностроении: тенденции развития, менеджмент, маркетинг». – Харьков: ХГПУ, 1997. – С. 291.
5. Кривошея, А.В. Структура многопараметрического отображения, обобщающая станочные и рабочие зубчатые зацепления [Текст] / А.В. Кривошея // Труды междунар. конф. «Высокие технологии в машиностроении: моделирование, оптимизация, диагностика». – Харьков: ХГПУ, 1995. – С. 71.
6. Интегрированные технологии ускоренного прототипирования и изготовления [Текст] / под ред. д-ра техн. наук Л.Л. ТОВАЖНЯНСКОГО, д-ра тех. наук А.И. ГРАБЧЕНКО. – Харьков: ОАО «Модель Вселенной», 2002. – 140 с. – Язык русский. ISBN 966-7875-12-1.
7. Тернюк, Н.Э. Проектирование инструментов для формообразования зубчатых колес двухпараметрических зацеплений с постоянным нормальным шагом [Текст] / Н.Э. Тернюк, Е.Б. Кондусова // Прогрессивные процессы механической обработки труднообрабатываемых материалов. – Мариуполь, 1989. – С. 58-59.
8. Гавриленко, В.А. Зубчатые передачи в машиностроении [Текст] / В.А. Гавриленко. – М.: Машгиз, 1962. – 252 с.
9. Тернюк, Н.Э. Абразивная обработка криволинейных зубьев сферических колес с постоянным нормальным шагом [Текст] / Н.Э. Тернюк, Н.А. Беззубенко, Е.Б. Кондусова // Интенсификация и автоматизированная разработка отделочно-зачистной и упрочняющей обработки. – Ростов/Д: РИСХМ, 1989. – С. 101-102.
10. 3D-моделирование инструментов, формообразования и съема припуска при обработке резанием [Текст] / под ред. П.Р. Родина / А.И. Грабченко, Е.Б. Кондусова, А.В. Кривошея, Н.С. Равская, П.Р. Родин. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2001. – 304 с.
11. Зубкова, Н.В. Методика 3D-моделирования режущих кромок и профилей режущих инструментов [Текст] / Н.В. Зубкова, Е.Б. Кондусова, О.Н. Кушнаренко // Высокие технологии: тенденции развития. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2002. – Вып. 62. – С. 172-176.
12. Перепелица, Б.А. Приложение многопараметрических отображений к задачам 3D-моделирования режущих инструментов и съема припуска [Текст] / Б.А. Перепелица, Е.Б. Кондусова // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2001. – Вып. 60. – С. 183-189.
13. Обкаточные резцы для зуботочения сферических зубчатых колес с постоянным нормальным шагом [Текст] / И.Е. Дюмин, Н.Э. Тернюк, Ю.В. Дудукалов [и др.] // Интерпартнер-92: тез. докл. – Харьков: ХПИ, 1992. – С. 86-88.
14. Родин, П.Р. Металлорежущие инструменты [Текст] / П.Р. Родин. – К.: Вища шк., 1979. – 431 с.
15. Кондусова, Е.Б. Анализ влияния характера задних поверхностей зуборезных долбяков на параметры обрабатываемых колес [Текст] / Е.Б. Кондусова // Высокие технологии: тенденции развития: тез. докл. междунар. конф. «Интерпартнер – 2005». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2005. – Вып. 72. – С 16-17.

Ключевые слова: зубчатое зацепление, двухпараметрическое зубчатое колесо, обкаточные инструменты, шевер, зубчатый хон, режущие-деформирующие обкатники с точечным контактом.

Аннотации

Запропоновано ряд методів формоутворення та обкатних інструментів для попередньої й остаточної обробки зубчастих коліс з постійним нормальним кроком для спеціальних двопараметричних зацеплень. Виконано аналітичний опис кінематики процесу зубонарізання і геометрії обкатних інструментів, які засновані на виробничій поверхні. Доведено доцільність використання рекомендованих методів формоутворення та інструментів.

Предложен ряд методов формообразования и обкаточных инструментов для предварительной и окончательной обработки зубчатых колес с постоянным нормальным шагом для специальных двухпараметрических зацеплений. Выполнено аналитическое описание кинематики процесса зубонарезания и геометрии обкаточных инструментов, основанных на производящей поверхности. Доказана целесообразность использования рекомендованных методов формообразования и инструментов.

A number of forming methods and rolling action tools for the preliminary and final treatment of gear-wheels with the permanent normal step for the special two-parameter gearing have been proposed. The analytical description of gearcutting kinematics and rolling action tools geometry, based on the generating flat, has been performed. The expedience of recommended forming methods and rolling action tools has been substantiated.

УДК 625.143.07

*Канд. экон. наук Б.А. Омарова
(Казахский ун-т путей сообщения)*

В.А. Omarova

ОЦЕНКА ПРОМЕРЗАНИЯ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ В РЕГИОНАХ КАЗАХСТАНА

EVALUATION OF FREEZING SUBGRADE RAILWAYS IN REGIONS OF KAZAKHSTAN

Представил д-р техн. наук, профессор Т.С. Саржанов

Введение. Железнодорожный транспорт нашел широкое применение в различных отраслях народного хозяйства Республики Казахстан. Общая протяженность железных дорог превышает

32 тыс. км, в том числе магистральных более 16 тыс. км, промышленных и карьерных железных дорог – столько же.

Одним из важных элементов железнодорожного пути является земляное

полотно, в основании которого залегают грунты и горные породы с различными физико-механическими свойствами, которые играют важную роль в обеспечении его устойчивого и стабильного состояния.

Известно, что объем ремонтных работ, связанных с содержанием земляного полотна, составляет более 40 % от общей стоимости содержания железнодорожного пути.

При эксплуатации железнодорожного пути мало внимания уделяется содержанию земляного полотна; во время капитального ремонта производится только замена рельсошпальной решетки, а загрязненный балласт не вывозится, а сдвигается на откос. Вследствие повышения массы и длины поездов, а также осевых нагрузок до 300 кН возникают остаточные деформации с разрушением щебня, особенно слабых горных пород. Значительное влияние на работу земляного полотна оказывают климатические факторы.

Постановка задачи. Таким образом, обеспечение работоспособности земляного полотна железнодорожного пути на основе управления физико-механическими параметрами земляного полотна железнодорожного пути является актуальной проблемой.

Изложение материала. Большая часть железных дорог Казахстана (более 70%) имеет земляное полотно, отсыпанное из глин, суглинков и супесей [1]. При плитном подрельсовом основании железнодорожного пути не допускается морозное пучение глинистых грунтов насыпей и выемок. Поскольку в северных районах Казахстана промерзание грунтов достигает, по данным профессора А.Д. Омарова [1], 2,3 м, необходимы конструктивные меры для защиты от промерзания глинистых грунтов земляного полотна. Для ближайшего к Казахстану региона Западной Сибири (по данным Г.П. Бредюка [2-3]) наибольшее промерзание отмечается в железнодорожных насыпях (см. таблицу).

Таблица

Расчетная глубина промерзания грунтов земляного полотна на двухпутных участках, м

Выемки (суглинки)	Нулевые места (суглинки)	Насыпи (суглинки)
2.5	2.6	2.7

Большее промерзание грунта насыпей (по сравнению с выемками) объясняется большей площадью конвективного теплообмена между насыпью и окружающим воздухом и меньшим удельным притоком тепла к насыпи от основания земляного полотна.

Территория Казахстана в основном размещается в 4-й и 3-й зонах по [4], где сумма отрицательных градусо-часов составляет от 780 до 2500 градусо-часов.

Грунтовый массив земляного полотна с действующими на него внешними силами является открытой термодинамической

системой, параметры состояния которой связаны между собой определенными соотношениями-уравнениями механики и термодинамики [4].

Теплопередача – процесс распространения тепла. Способы переноса тепла: теплопроводность (реализуется внутри твердых тел), конвекция (возникает в результате перемешивания в жидкостях и газах), тепловое излучение (лучеиспускание). В реальных условиях тепло передается комбинированным способом.

Периодические изменения составляющих уравнений радиационно-

теплого баланса описываются выражением

$$R - \Phi - P - B = 0, \quad (1)$$

где R – радиационный баланс,
 Φ – затраты тепла на фазовые переходы воды,
 P – турбулентный энергообмен поверхности с атмосферой,
 B – теплообмен между поверхностью и толщей выделенного грунтового массива.

Количество теплоты, передаваемой от горячего теплоносителя, прямо пропорционально площади теплопередающей

поверхности F , действующей средней разности температур Δt , продолжительности процесса T и коэффициенту теплоотдачи α :

$$Q = \alpha F (t_{cm} - t_{oc}) = \alpha F \Delta t \tau. \quad (2)$$

Коэффициент теплоотдачи α показывает, какое количество теплоты передаётся от горячего теплоносителя к холодному через 1 м² поверхности при средней разности температур в 1 градус за 1 с:

$$\alpha = \frac{Q}{F \Delta t \tau} \left[\frac{\text{дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{град}} \right], \left[\frac{\text{вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}} \right], \left[\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}} \right]. \quad (3)$$

Уравнение теплопроводности в сплошной среде имеет вид

$$K_x \left(\frac{\partial^2 T}{\partial X^2} \right) + K_y \left(\frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} \right) + K_z \left(\frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \right) + Q = \rho C \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (4)$$

где K_x, K_y, K_z – коэффициенты теплопроводности в направлении глобальных осей X, Y, Z , кВт/м;

T – температура градусов Цельсия;

Q – источник тепла внутри тела, который считается положительным, если тепло подводится к телу, кВт/м³;

ρ – плотность, Т/м³;

C – удельная теплоемкость, Дж/кг;

t – время.

Если температура известна на некоторой части границы, то можно записать

$$T = T_B(S), \quad (5)$$

где T_B – температура на границе, которая может быть функцией координат точек поверхности S .

Если на границе происходит конвективный теплообмен, который характеризуется величиной $h(T - T_\infty)$, или задан поток тепла q , то граничное условие имеет вид

$$K_x \frac{\partial T}{\partial X} 1_x + K_y \frac{\partial T}{\partial Y} 1_y + K_z \frac{\partial T}{\partial Z} 1_z + h(T - T_\infty) + q = 0, \quad (6)$$

где h – коэффициент теплообмена, кВт/м²;

T – температура на границе (неизвестная);

T_{∞} – температура окружающей среды (известная);

l_x, l_y, l_z – направляющие косинусы;

q – поток тепла, кВт/м².

При расчетах теплоизолирующих устройств и покрытий определяется глубина промерзания утепляемого грунта z , м, и толщина подушки или покрытия m , м.

Глубина промерзания грунта z для любого однородного грунта может быть определена непосредственными прямыми наблюдениями или взята по данным мерзлотомеров. Как правило, она принимается как максимальная из максимальных глубин сезонного промерзания грунта по данным многолетних наблюдений за период не менее 10 лет.

При отсутствии таких данных она может быть рассчитана в соответствии с указаниями [4] по следующей формуле (при промерзании грунтов до 2,5 м):

$$z = d_{fn} \sqrt{M_t}, \quad (7)$$

где d_{fn} – нормативное значение глубины промерзания, м;

d_0 – параметр (найденный эмпирически), принимаемый равным для суглинков и глин 0,23 м; супесей, песков мелких и пылеватых – 0,28 м; песков гравелистых, крупных и средней крупности – 0,30 м и крупнообломочных грунтов – 0,34; значение d_0 для грунтов неоднородного сложения может определяться как средневзвешенное в пределах глубины промерзания;

M_t – безразмерный коэффициент, численно равный сумме абсолютных значений среднемесячных отрицательных температур за зиму в данном районе, принимаемых по результатам наблюдений местной гидрометеорологической станции, а при их отсутствии по СНиП 23-01-99 «Строительная климатология» [5].

Для расчетов промерзания насыпей на плитном основании не удается использовать традиционную методику, предназначенную для однородного грунта. Для сложных многослойных конструкций насыпей эффективно применение численных методов, позволяющих учесть конвективный теплообмен грунта верха и откосов насыпи и охлажденного воздуха и тепловой поток через основание насыпи. Толщина и ширина пенопластового покрытия определяется теплотехническим расчетом из условия полного выведения пучинистых грунтов из зоны промерзания. Минимальная толщина покрытия принимается 0,04 м, а ширина – 4 м под один путь. Обязательной является срезка обочин земляного полотна до уровня пенопласта для отвода воды из балластного слоя.

Покрытия должны иметь довольно высокие прочностные характеристики. Материалы покрытия должны выдерживать напряжения, возникающие при укладке на них щебеночного балласта, а геометрические размеры должны обеспечивать возможность укладки при работе щебнеочистительных машин.

Надежность и долговечность пенополистирола определяется пределом прочности его на сжатие и водопоглощением. Длину плит пенополистирола принимают равной ширине покрытия основной площадки земляного полотна (4...5 м). Длина плит допускается не менее половины ширины покрытия.

Профессором Э.П. Исаенко и к.т.н. М.В. Безруковым [5] разработана конечно-элементная модель бесстыкового пути, включающая рельсошпальную решетку (с параметрами ее геометрии, моментов инерции, прочностных характеристик) с присоединенными к ней упругими элементами типа Spring, Gap, DOF, крутильной жесткости, учитывающими вертикальную (различную вверх и вниз) упругость пути, поперечную и продольную

упругость пути и сопротивление повороту рельса в узле скрепления без отрыва от подкладки. Эта модель для прямых и кривых может учитывать прижатие рельса клеммой скрепления, отступления от норм содержания пути (просадки пути и углы по направлению), ослабления пути при производстве работ (количество освобожденных от балласта торцов шпал) и заметно реагирует на изменение исходных данных. Может быть использована для оценки влияния на устойчивость пути против выброса работающих на пути машин.

Расчеты промерзания слоистых грунтовых железнодорожных насыпей, состоящих из разных по теплотехническим характеристикам материалов, можно выполнить только численными методами. В наших расчетах использована программная система COSMOS/M.

Конечно-элементная модель промерзающей насыпи приведена на рис. 1.

На рис. 2-3 приведены расчетные распределения температур в зависимости от величины отрицательных градусо-часов при устройстве теплоизолирующего пенополистирольного покрытия и без него.

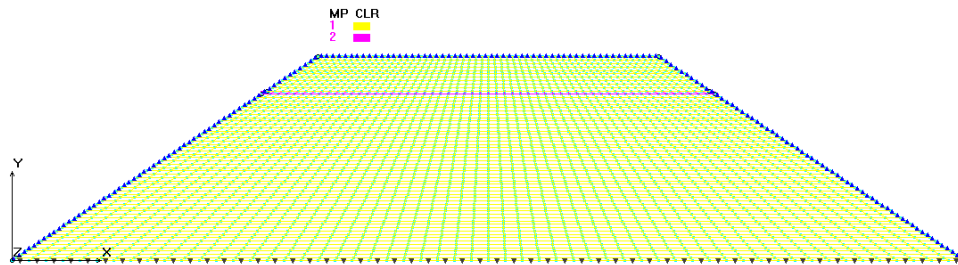


Рис. 1. Конечно-элементная модель промерзающей насыпи

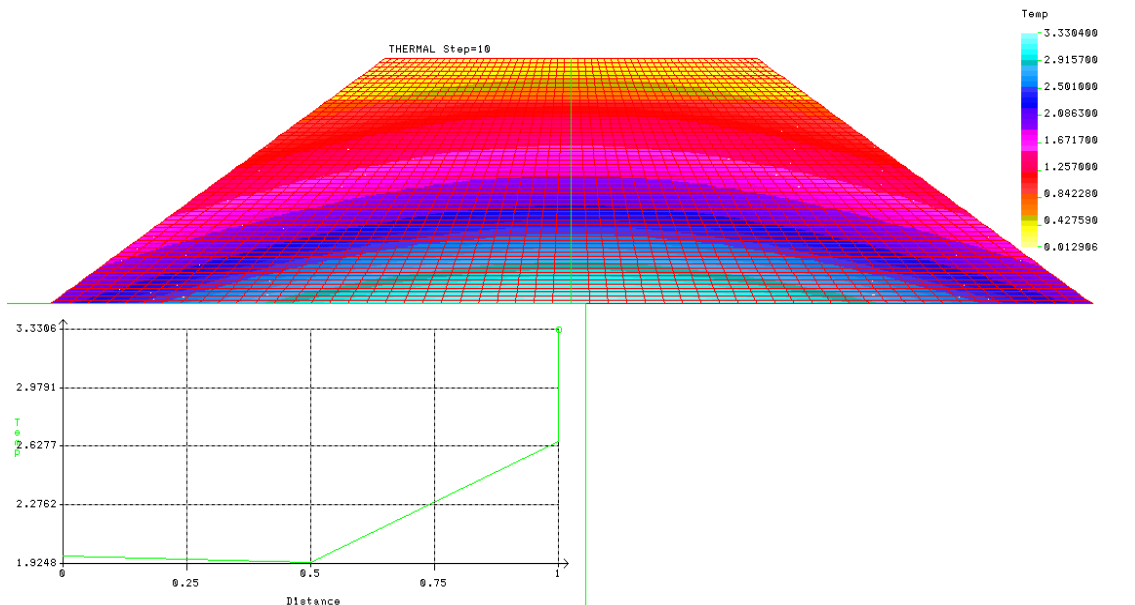


Рис. 2. Распределение температур в насыпи при устройстве теплозащитного слоя через - 2400 отрицательных градусо-часов. На графике показано распределение температур по оси насыпи от верха до основания насыпи

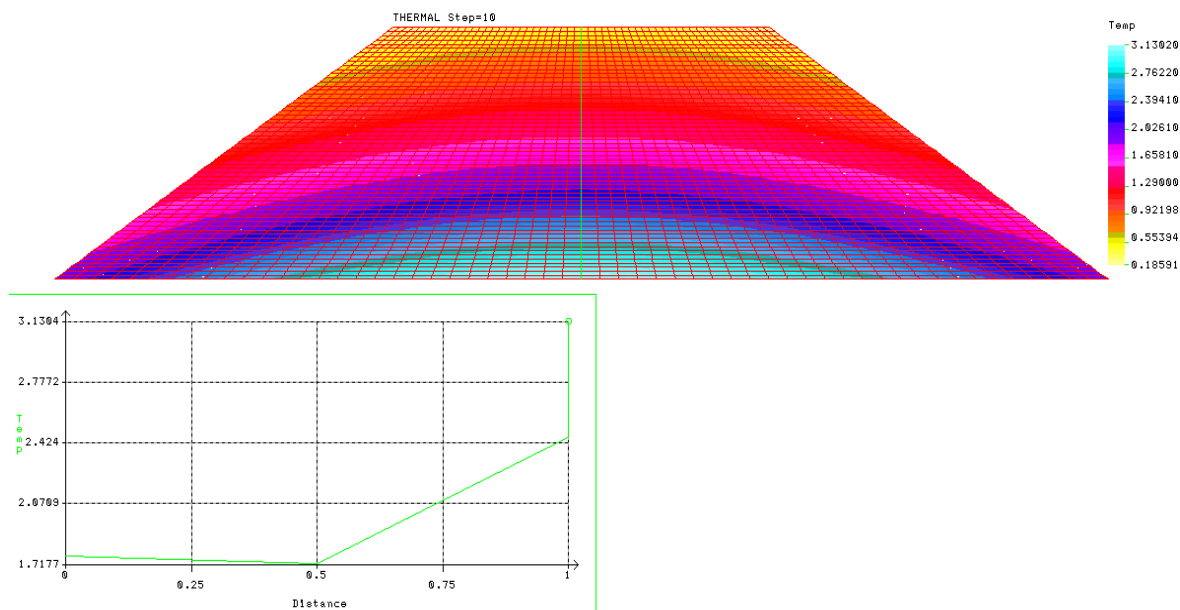


Рис. 3. Распределение температур в теле насыпи без устройства теплоизолирующего слоя после 2400 отрицательных градусо-часов

Вывод. При устройстве железнодорожного пути на плитном основании обязательно размещение теплозащитного

слоя в Южной, Средней и Северной зонах Казахстана (если глинистые грунты попадают в зону промерзания).

Список литературы

1. Омаров, А.Д. Земляное полотно железных дорог Казахстана [Текст] / А.Д. Омаров. – Алматы: Бастау, 2000. – 208 с.
2. Бредюк, Г.П. Автоматизированная система постановки пути в проектное положение [Текст] / Г.П. Бредюк // Путь и путевое хозяйство. – 1997. – № 12. – С. 22-27.
3. Бредюк, Г.П. Расчет противоположных устройств [Текст] / Г.П. Бредюк // Путь и путевое хозяйство. – 1996. – № 3. – С. 34-36.
4. Строительно-технические нормы МПС РФ. Железные дороги колеи 1520 мм / СТН Ц-01-95 [Текст]. – М.: Транспорт, 1995. – 199 с.
5. Исаенко, Э.П. Расчеты железнодорожного пути с использованием конечно-элементных моделей [Текст]: учеб.-метод. пособие / Э.П. Исаенко, М.В. Безруков, С.Ю. Иванов, Ш.Н. Шайдуллин, С.П. Васильев. – Нижний Новгород: Нижегородский печатник, 2002. – 215 с.

Ключевые слова: скорость, метод, состав, деформация, нагрузка.

Аннотации

Навантаження залізничної колії рухомим складом є випадковим процесом, залежним від його конструкції і параметрів, осьових навантажень, швидкості руху, деформацій колії під навантаженням, нерівностей, як на рейках, так і на колесах, динамічних якостей

рухомого складу, змінності жорсткісних і дисипативних характеристик, температурних навантажень тощо. В статті розглядається можливість чисельного моделювання залізничної колії методом кінцевих елементів.

Нагрузка железнодорожного пути подвижным составом является случайным процессом, зависящим от его конструкции и параметров, осевых нагрузок, скорости движения, деформаций пути под нагрузкой, неровностей, как на рельсах, так и на колесах, динамических качеств подвижного состава, переменности жесткостных и диссипативных характеристик, температурных напряжений и др. В статье рассматривается возможность численного моделирования железнодорожного пути методом конечных элементов.

Loading of a railway way a rolling stock is the casual process depending on its design and parameters, axial loadings, speeds of movement, way deformations under loading, roughnesses both on rails, and on wheels, dynamic qualities of a rolling stock, variability of the stiffness and dissipation characteristics, temperature tension, etc. In article possibility of numerical modeling of a railway way is considered by a method of final elements.

УДК 624.072.33

*Д-р техн. наук А.П. Фалендиш,
інж. Е.А. Беліков*

*A.P. Falendysh
E.A. Belikov*

**ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
СТАЛЕБЕТОННОЇ БАЛКИ ПРЯМОКУТНОГО ПЕРЕРІЗУ**

**CROSS-SECTION CHARACTERIZATION OF SQUARE STEEL
CONCRETE BEAM**

Постановка проблеми. Проектування на стадії створення технічного проекту пов'язано з конструктивними розробками елементів вузлів та сполучень, із виконанням розрахунків для визначення розмірів елементів та їх перерізів та створення робочих креслень. Споруда, яку побудовано за оптимальним проектом, має відрізнятися від інших, подібних, меншими витратами матеріалів, масою чи вартістю. При розробленні ефективного алгоритму визначення області оптимальних геометричних розмірів сталобетонної балки прямокутного перерізу необхідно враховувати можливі ресурси матеріалів, з яких виготовлено конструкцію [1,2].

Аналіз основних досліджень і публікацій. Протягом останніх років нарівні із значними експериментальними дослідженнями сталобетонних та трубобетонних конструкцій, що виконані під керівництвом професорів Е.Д. Чихладзе та Л.І. Стороженка [3,4], велика увага приділяється раціоналізації перерізів таких конструкцій, що дозволяє значно покращити показники їх матеріалоемності, вартості та трудомісткості [5,6].

Формулювання цілей статті. Мета досліджень полягає в розробленні

математичної моделі аналізу несучої здатності сталобетонної балки за допомогою методу приведенного перерізу та графічного визначення області оптимальних геометричних характеристик з урахуванням властивостей матеріалів (бетон та сталь).

Основний матеріал досліджень. Розглянемо сталобетонну балку прямокутного перерізу. Її розрахунок будемо проводити згідно з методом приведенного перерізу, який дозволяє розраховувати конструкції з різних матеріалів за допустимими напруженнями.

Знайдемо площу поперечного перерізу, приведенного до бетону, за формулою

$$A_c' = A_c + \eta_c \cdot A_s \quad (1)$$

Площу поперечного перерізу, приведенного до сталі, визначаємо за формулою

$$A_s' = A_s + \eta_s \cdot A_c \quad (2)$$

де η_s , η_c – коефіцієнти, що визначають співвідношення модулів пружності матеріалів (сталі та бетону) приведенного перерізу, який визначається згідно з формулами для приведенного бетонного та сталюого перерізів відповідно:

$$\eta_b = \frac{E_s}{E_c}, \quad \eta_s = \frac{E_c}{E_s}. \quad (3)$$

$$A_s = (h - 2\delta) \cdot (b - 2\delta), \quad (4)$$

Розглянемо характер зміни площі початкового бетонного перерізу (рис. 1) в залежності від зміни його геометричних розмірів:

де h, δ, b – геометричні характеристики початкового поперечного перерізу, см: $\delta = (0.1 \div 1.0)$, $h = 2 \cdot b$, $b = (1 \div 100)$.

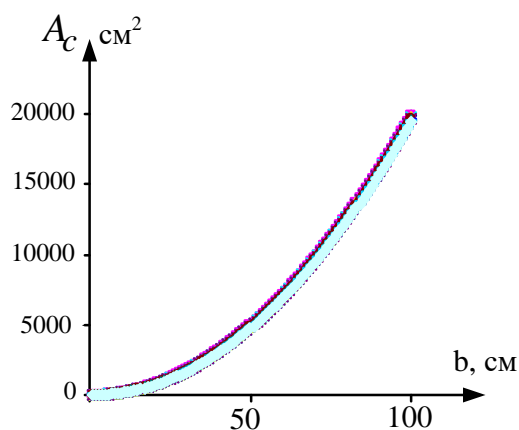


Рис. 1. Зміна початкової площі бетону

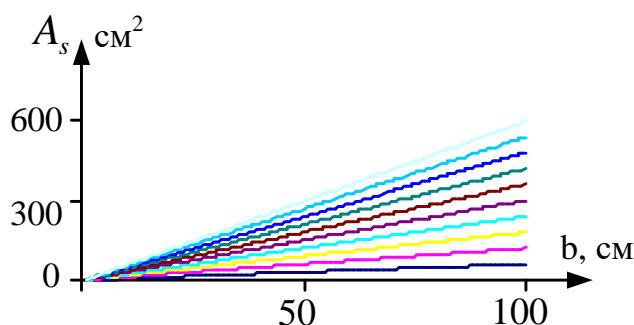


Рис. 2. Зміна початкової площі сталі

Визначимо площу приведенного бетонного перерізу (1) при класі бетону С16/20, С25/30, С32/40:

$$A_s(\delta, b) = h \cdot b - A_s(\delta, b). \quad (6)$$

Обчислюємо площу приведенного сталю перерізу (2):

$$A_c'(\delta, b) = A_c(\delta, b) + \eta_c \times A_s(\delta, b). \quad (5)$$

$$A_s'(\delta, b) = A_s(\delta, b) + \eta_s \times A_c(\delta, b). \quad (7)$$

Розглянемо характер зміни площі початкового сталю перерізу (рис. 2) в залежності від зміни його геометричних розмірів:

Порівняльні графіки приведенної площі бетонного та сталю перерізів у залежності від класу бетону й товщини обійми на рис. 3 та 4.

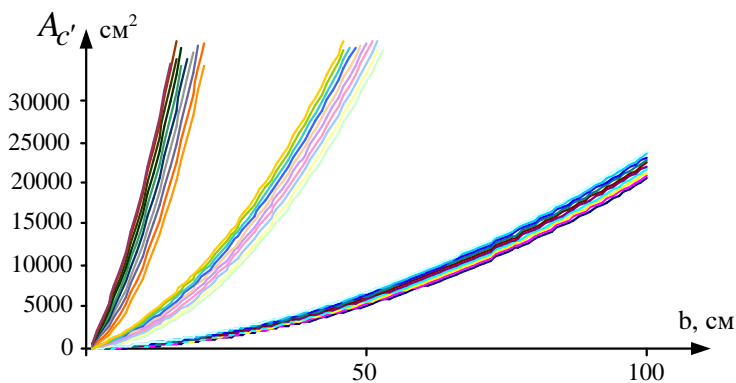


Рис. 3. Значення приведенної площі бетонного перерізу в залежності від класу бетону й товщини обійми

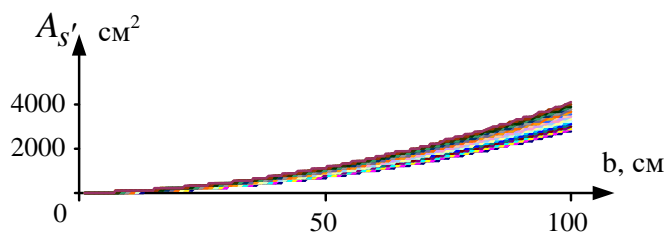


Рис. 4. Значення приведеної площі сталюого перерізу

Приведений модуль пружності бетонного перерізу становить:

$$\frac{E_c}{A_c} + \frac{E_s}{A_s} = \frac{E_{c'}}{A_{c'}} \quad (8)$$

$$E_{c'} = A_{c'} \times \left[\left(\frac{E_c}{A_c} + \frac{E_s}{A_s} \right) \right] \quad (9)$$

Приведений модуль пружності сталюого перерізу:

$$\frac{E_c}{A_c} + \frac{E_s}{A_s} = \frac{E_{s'}}{A_{s'}} \quad (10)$$

$$E_{s'} = A_{s'} \times \left[\left(\frac{E_c}{A_c} + \frac{E_s}{A_s} \right) \right] \quad (11)$$

Визначимо приведенний момент інерції бетонного та сталюого перерізів:

$$I_{c'} = I_c + \eta_c \times I_s \quad (12)$$

$$I_{s'} = I_s + \eta_s \times I_c \quad (13)$$

де $I_c = \frac{(b - 2\delta) \times (h - 2\delta)^3}{12}$,

$$I_s = \left[\left(\frac{h - \delta}{2} \cdot b \cdot 2\delta \right) \right] \text{ чи} \quad (14)$$

$$I_s = \frac{(bh^3)}{12} - \left[\frac{(b - 2\delta) \times (h - 2\delta)^3}{12} \right]$$

На рис. 5 та 6 наведено порівняльні графіки приведенного моменту інерції бетонного та сталюого перерізів у залежності від класу бетону й товщини обійми.

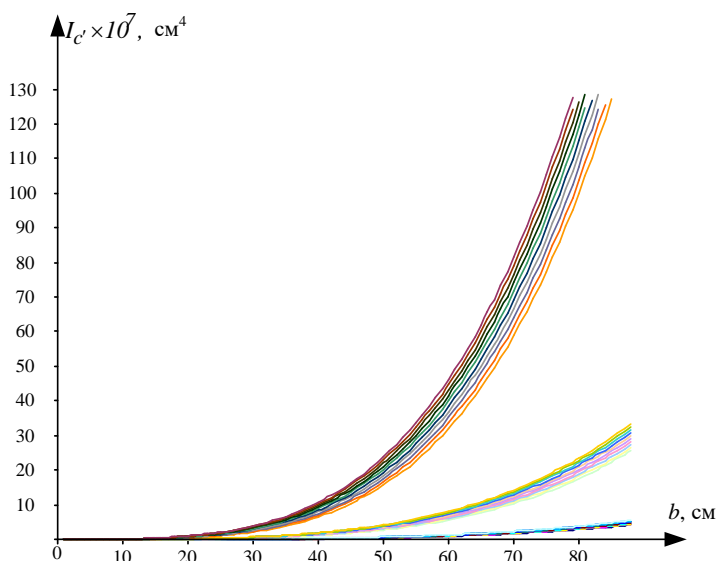


Рис. 5. Значення приведенного моменту інерції бетонного перерізу

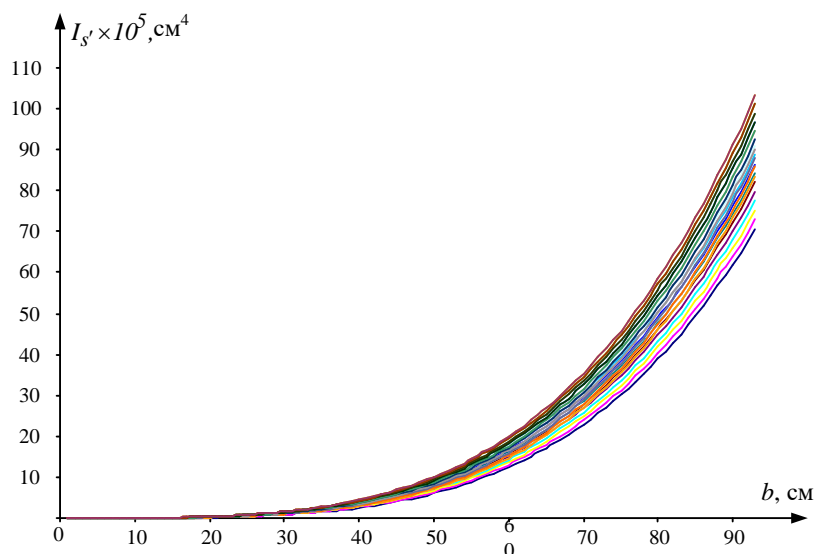


Рис. 6. Значення приведенного моменту інерції сталю перерізу

Висновки. Отримано області оптимальних геометричних характеристик для сталобетонної балки прямокутного поперечного перерізу з бетонами класу С16/20, С25/30, С32/40 та різною товщиною обойми.

Список літератури

1. Чихладзе, Е.Д. Спрощена діаграма граничних станів сталобетонного елемента в задачах оптимізації стержневих конструкцій [Текст] / Е.Д. Чихладзе, М.Г. Черненко // Зб. наук. праць. – К.: НДІБК, 2003. – Вип. 59, кн.1. – С. 310-317.
2. Черненко, М.Г. Узагальнена діаграма граничних станів елемента в задачах оптимізації стержневих конструкцій [Текст] / М.Г. Черненко // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2003. – Вип. 56. – С. 100-105.
3. Расчет трубобетонных конструкций [Текст] / Л.И. Стороженко, П.И. Плахотный, А.Я. Чорний. – К.: Будівельник, 1991. – 120 с.
4. Основы расчета и проектирования комбинированных и сталобетонных конструкций [Текст] / Э.Д. Чихладзе, Г.Л. Ватуля, Ю.П. Китов [и др.]; под ред Э.Д. Чихладзе. – К.: Транспорт Украины, 2006. – 104 с.
5. Китов, Ю.П. Влияние параметров проектирования на оптимальность конструкции стальных балок / Ю.П. Китов, Г.Л. Ватуля // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2011. – Вип. 56. – С. 100-105.

Ключові слова: початкові геометричні характеристики, приведений момент інерції, модуль пружності, сталобетонна балка.

Анотації

Отримано області, які є оптимальними за критерієм раціонального використання запасу міцності матеріалів конструкції (бетону та сталі), для геометричних характеристик

поперечних перерізів сталобетонної балки з бетонами класу С16/20, С25/30, С32/40 та товщиною обійми від 0,1 до 1,0 см.

Выбраны оптимальные области по критерию рационального использования запаса прочности материала конструкции (бетона и стали), для геометрических характеристик поперечных сечений сталобетонной балки с бетонами класса С16/20, С25/30, С32/40 и толщиной обоймы от 0,1 до 1,0 см.

It's determine the optimal data area using the criteria of rational utilizing of material (steel and concrete) safety coefficient for cross-sections geometrical properties of steel concrete beam with concrete strength С16/20, С25/30, С32/40 and case thickness from 0.1 to 1.0 sm.

УДК 629.463.32.001.57

*Д-р техн. наук І.Е. Мартинов,
асист. М.В. Павлюченков*

*I. Martynov
M. Pavlyuchenkov*

ОПТИМІЗАЦІЯ ОПОРНОГО ПРИСТРОЮ ВАГОНА-ЦИСТЕРНИ

OPTIMIZATION OF THE SUPPORT DEVICE OF RAIL TANK CAR

Вступ. Вагони-цистерни є одним з масових типів залізничного рухомого складу. Умови експлуатації транспортних засобів ставлять підвищені вимоги до міцності існуючих і нових конструкцій цистерн. Одним з пріоритетних завдань розвитку залізниць є удосконалення конструкції рухомого складу для підвищення його рентабельності та конкурентоспроможності.

Актуальність. Дослідження, які проводилися провідними організаціями в галузі рухомого складу, свідчать, що напруження, обумовлені дією опорного тиску, складають 70-90 % від максимальних напружень, які виникають у котлі цистерни. Упродовж тривалого часу експлуатації нафтобензинових цистерн були виявлені найбільш слабкі місця в їх конструкції, які проявляються у вигляді

відмов, пов'язаних з течєю і деформацією котлів, тріщинами в елементах рами та ін. Несправності, пов'язані з течєю котла в опорній зоні, складають 45,5 % від усіх пошкоджень вагона.

У цих умовах актуальним є завдання подальшого розвитку й удосконалення конструкції цистерни. Одним з напрямків є застосування нових конструктивних рішень опорних пристроїв котла на раму.

Мета дослідження полягає в удосконаленні конструкції вагона-цистерни за рахунок нового технічного рішення консольного опорного пристрою і зниження його металоємності.

Виклад основного матеріалу. Для вирішення поставленого завдання виконано дослідження для пошуку оптимальної конструкції опорного пристрою. На першому етапі зроблено патентно-бібліографіч-

ний аналіз технічних рішень [1, 2] та запропоновано нові варіанти конструкцій [3, 4].

Аналіз результатів розрахунків показав, що для першого варіанта максимальні напруження в опорній зоні склали 28,5 МПа, що на 15 % менше в порівнянні з існуючою конструкцією. Також наявне зменшення площі дії максимальних напружень. За результатами обчислень для другого і третього варіантів виявилось, що значення максимального еквівалентного напруження зменшується на

$$D = \left\{ t_1, t_2, t_3, a \mid 6 \text{ мм} \leq t_1 \leq 14 \text{ мм}; 6 \text{ мм} \leq t_2 \leq 14 \text{ мм}; 6 \text{ мм} \leq t_3 \leq 14 \text{ мм}; 200 \text{ мм} \leq a \leq 500 \text{ мм} \right\} \quad (2)$$

$$D_x = \left\{ t_1, t_2, t_3, a \mid \begin{array}{l} m^{npon} \leq m^{icn}; \sigma_{рам}^{npon} \leq \sigma_{рам}^{icn} \leq [\sigma_{рам}]; \sigma_{кот}^{npon} \leq \sigma_{кот}^{icn} \leq [\sigma_{кот}]; 6 \text{ мм} \leq t_1 \leq 14 \text{ мм}; \\ 6 \text{ мм} \leq t_2 \leq 14 \text{ мм}; 6 \text{ мм} \leq t_3 \leq 14 \text{ мм}; 200 \text{ мм} \leq a \leq 500 \text{ мм} \end{array} \right\},$$

де D – область можливих розв’язків, яка формується границями варіювання складових вектора змінних параметрів \bar{X} ; D_x – область допустимих розв’язків; m^{icn} – маса сучасної конструкції опорного пристрою чотиривісної залізничної цистерни; t_1, t_2, t_3 – товщини вертикальної діафрагми, нижнього та торцевого листів відповідно; a – ширина запропонованої конструкції вздовж твірної котла цистерни; $\sigma_{рам}^{npon}, \sigma_{кот}^{npon}$ – максимальні еквівалентні напруження, які виникають в опорі та опорній зоні котла запропонованої конструкції; $\sigma_{рам}^{icn}, \sigma_{кот}^{icn}$ – максимальні еквівалентні напруження, які виникають в опорі та опорній зоні котла існуючої конструкції; $[\sigma_{рам}], [\sigma_{кот}]$ – допустимі напруження в рамі та котлі цистерни.

Для дослідження НДС конструкції з різними геометричними розмірами прийняті такі навантаження: вага брутто вагона з урахуванням коефіцієнта вертикальної динаміки; гідравлічний удар у цистерні при екстремальному значенні повздовжньої сили 3,5 МН. Допустимі напруження в рамі та котлі цистерни для I-

13 % [3, 4]. Проведені розрахунки опорних пристроїв дозволяють зробити висновок, що виходячи із значень еквівалентних напружень найбільш ефективним є перший варіант [5].

На другому етапі для нього складена функція цілі та обмеження:

$$m^{npon}(\bar{X}) \rightarrow \min$$

$$\bar{X} \in D_x \in D \quad (1)$$

го розрахункового режиму складають $[\sigma] = 0,9\sigma_T = 292,5 \text{ МПа}$.

З урахуванням вихідних даних (2) складається математичний план, який має відповідну матрицю планування. На її основі складається ортогональний математичний план другого порядку для чотирьох керованих змінних, що варіюються на трьох рівнях.

Для кожного режиму математичного плану з використанням розрахункової моделі вагона-цистерни обчислюються значення показників, що контролюються, – маса опорного пристрою, що пропонується m^{npon} , максимальні еквівалентні напруження, які виникають в опорі та опорній зоні котла нової конструкції – $\sigma_{рам}^{npon}, \sigma_{кот}^{npon}$.

З використанням отриманих значень $m^{npon}, \sigma_{рам}^{npon}, \sigma_{кот}^{npon}$ виконується їх апроксимація у вигляді поліномів другого ступеня.

Нижче подано узагальнені математичні моделі для контрольованих показників у дійсних величинах змінних:

$$m^{npon} = 0,026 + 30315,15t_1 - 3282,85t_2 + 11,566t_3 + 0,455a - 96661,109t_1^2 + 98763,982t_2^2 - 1143,356t_3^2 - 1,547a^2 - 929,864t_1t_2 - 1719,577t_1t_3 - 2601,336t_1a + 1459,122t_2t_3 + 21759,325t_2a - 11001,238t_3a \quad (3)$$

$$\sigma_{m^{npon}} = \pm 28,3 \text{ кг}$$

$$\sigma_{рам}^{npon} = 2445,633 - 32106,203t_1 + 14160,405t_2 - 343557,841t_3 - 528,629a - 1893377,319t_1^2 - 931753,335t_2^2 + 1313209324t_3^2 - 834,011a^2 - 2445828,413t_1t_2 + 522987,688t_1t_3 + 40050,0t_1a + 359903,70t_2t_3 + 60560,647t_2a + 10833,942t_3a \quad (4)$$

$$\sigma_{рам}^{npon} = \pm 17,7 \text{ МПа.}$$

$$\sigma_{кот}^{npon} = 81,464 + 2948,819t_1 - 2984,917t_2 + 1790,687t_3 + 100,661a + 2556,003t_1^2 + 24780,923t_2^2 - 20093,994t_3^2 - 137,495a^2 + 16967,531t_1t_2 - 64729,459t_1t_3 - 5238,180t_1a - 34549,856t_2t_3 + 5401,132t_2a - 552,842t_3a \quad (5)$$

$$\sigma_{кот}^{npon} = \pm 7,5 \text{ МПа.}$$

Величини середньоквадратичних відхилень для отриманих узагальнених математичних моделей свідчать про їх адекватність і придатність для використання в подальших дослідженнях з визначення геометричних параметрів опорного пристрою вагона-цистерни.

Для розв'язання задачі оптимізації (1) використовувався метод Нелдера-Міда. Ідея методу полягає у порівнянні значень функції в $n+1$ вершинах симплекса та переміщенні точок симплекса у напрямі оптимальної точки за допомогою ітераційної процедури.

Спочатку при різних початкових значеннях параметрів проводилась оптимізація всіх чотирьох параметрів. При цьому перші два параметри змінювалися, даючи різні значення функції, що мінімізується, а t_3 та a залишалися практично

незмінними: $t_3 = 0,01 \text{ м}$, $a = 0,3 \text{ м}$. Це дало можливість при фіксованих значеннях x_3 та x_4 звести задачу до оптимізації двох параметрів x_1 та x_2 . З точністю до 3% отримані значення $t_1 = 0,0114 \text{ м}$, $t_2 = 0,0094 \text{ м}$, при цьому

$$m^{npon} = 405 \text{ кг}, \sigma_{рам}^{npon} = 290 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{кот}^{npon} = 110 \text{ МПа.}$$

При відомих значеннях двох параметрів t_3 та a для оптимізації t_1 та t_2 можна скористатися графічним методом. Для цього за допомогою отриманих апроксимацій були обчислені функції $\sigma_{рам}^{npon}$, $\sigma_{кот}^{npon}$, m^{npon} на сітці 100×100 та побудовані ізолінії цих функцій (рисунок).

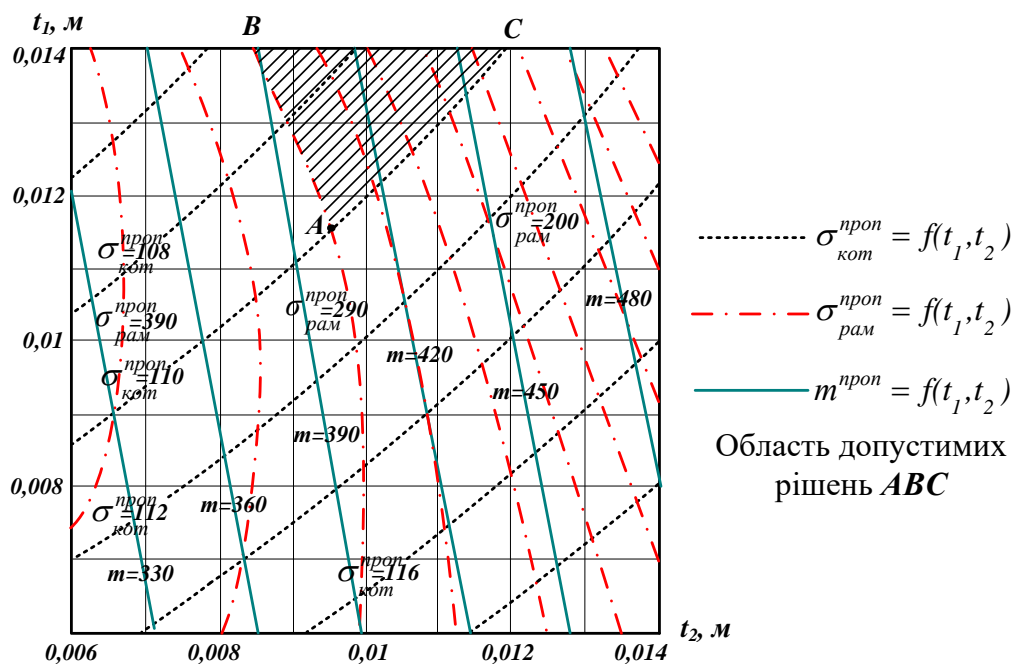


Рис. Графік визначення оптимальних параметрів конструкції опорного пристрою вагона-цистерни

З графіка (рисунок) видно, що оптимальними є параметри в точці А: $t_1 = 0,0116$ м та $t_2 = 0,0095$ м. Пошук, що здійснювався в області допустимих розв'язків D_x , дав можливість як оптимальні визначити такі величини параметрів: $t_1 = 12$ мм; $t_2 = 10$ мм. Таке рішення обґрунтовується встановленими ГОСТ 19903-74 нормованими значеннями листового прокату ($\delta = 4$ мм; 4,5 мм; 5 мм; 6 мм, 7 мм, 8 мм, 9 мм, 10 мм, 12 мм...) і технологічними особливостями виготовлення опорного пристрою вагона-цистерни. Як видно, результати оптимізації по чотирьох змінних, які отримані двома способами, дуже близькі. При більшій кількості змінних зручніше користуватися числовим методом.

Маса конструкції опорного пристрою при оптимальних значеннях $t_1 = 12$ мм, $t_2 = 10$ мм, $t_3 = 10$ мм, $a = 0,3$ м становить

$m^{prop} = 415$ кг, що на 13% менше у порівнянні з існуючою конструкцією.

Висновки

1. Виконано математичний опис задачі оптимізаційного проектування за критерієм мінімальної матеріалоемності опорного пристрою вагона-цистерни та використано його для конструкції, що пропонується.

2. Для розв'язання задачі оптимізаційного проектування за критерієм мінімальної матеріалоемності опорного пристрою вагона-цистерни використано числовий та графічний методи.

3. Маса конструкції опорного пристрою при оптимальних значеннях $t_1 = 12$ мм, $t_2 = 10$ мм, $t_3 = 10$ мм, $a = 0,3$ м становить $m^{prop} = 415$ кг, що на 13% менше у порівнянні з існуючою конструкцією.

Список літератури

1. Исследования по изысканию новых конструктивных схем четырехосных вагонов-цистерн с целью снижения их металлоемкости [Текст]: отчет о НИР (заключ.) / Всесоюзн. науч.-исслед. ин-т вагоностроения (НИИВ); рук. В.С. Лагута. – Кременчуг, 1985. Ч. 1. – 63 с. – Шифр работы № ГР 01840013267; Инв. № 02850060917.

2. Лагута, В.С. Анализ конструктивных вариантов вагонов-цистерн. Развитие конструкций вагонов. Анализ результатов испытаний и эксплуатации [Текст] / В.С. Лагута, А.В. Донченко, Ю.Я. Водяников // Сб. науч. тр. НИИвагоностроения. – 1988. – С. 58 – 64.

3. Павлюченков, М.В. Дослідження конструктивних варіантів опор залізничних цистерн для перевезення рідких вантажів [Текст] / М.В. Павлюченков // Рухомий склад та спеціальна техніка залізничного транспорту / Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2010 – Вип. 117. – С. 59 – 63.

4. Ломотько, Д.В. Компьютерное моделирование опорных устройств вагонов-цистерн / Д.В. Ломотько, Г.Л. Ватуля, М.В. Павлюченков [Текст] // Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании'2012: сб. науч. тр. Sworld. – Одесса: Т. 2. – Транспорт, 2012. – С. 42 – 46.

5. Пат. 72134 Україна, МПК В 61 D 5/06. Пристрій для кріплення котла залізничної цистерни на рамі ходової частини [Текст] / Павлюченков М.В.; заявник та патентовласник Українська державна академія залізничного транспорту. – № u2012 00495; заявл. 16.01.12; опубл. 10.08.12, Бюл. №15.

Ключові слова: вагон-цистерна, консольний опорний пристрій, функція цілі, узагальнена математична модель, оптимальні параметри.

Анотації

Задача оптимізаційного проектування за критерієм мінімальної матеріалоемності опорного пристрою вагона-цистерни числовим та графічним методами.

Выполнена задача оптимизационного проектирования по критерию минимальной материалоемкости опорного устройства вагона цистерны численным и графическим методами.

The task of the optimization planning is executed on the criterion of the minimum resource-demanding of support device of rail tank executed numeral and graphic methods.

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ
ЖОРСТКОСТІ ПРОМІЖНИХ СКРІПЛЕНЬ ТИПУ ДО
В УМОВАХ ПРОМИСЛОВОГО ТРАНСПОРТУ**

**THE EXPERIMENTAL RESULTS HARDNESS INTERMEDIATE
FASTENING ELEMENTS SUCH AS DO, OBTAINED FOR
AN INDUSTRIAL RAILWAY**

Вступ. Основними параметрами, що формують вертикальну жорсткість і жорсткості скріплень ДО при горизонтальному поперечному вигині і крученні рейки є, як було встановлено на підставі аналізу, виконаного в статті [1], коефіцієнт постілі підкладки $C_{под}$ ($кН / м^3$) і жорсткість костилів при їх поперечному віджиманні.

Аналіз досліджень і публікацій. Для умов магістрального залізничного транспорту найбільш застосовуваною є загальна розрахункова схема рейкової колії у вигляді балок – рейок, які спираються на суцільну пружну основу, що має постійні пружні характеристики. Результати експериментальних досліджень просторових пружних характеристик пружної

основи при дерев'яних шпалах зі скріпленням типу ДО наведено в роботах О.П. Єршкова, М.І. Карпуценка, О.І. Гасанова, Г.М. Шахунянца та інших вчених.

Основна частина. Для визначення величини коефіцієнта постелі дерев'яних шпал в умовах промислового транспорту і змін цієї величини в процесі експлуатації колії були використані результати експериментальних робіт, проведених на металургійних і гірничодобувних підприємствах України з використанням методики, докладно викладеною в статті [2].

Роботи проводилися на шести дослідних ділянках, на яких обертався різний рухомий склад і які розрізнялися термінами служби колії. Експлуатаційні характеристики ділянок наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Характеристики дослідних ділянок для визначення параметрів вертикальної жорсткості скріплень ДО

Номер ділянки	Тип рухомого складу	Осьові навантаження, $кН$	Швидкість руху, $км/год$	Термін служби колії, роки
1	2	3	4	5
1	Чавуновоз 80 т	353	<5	5
2	Чавуновоз 80 т	353	<5	5
3	Шлаковоз 11 м ³	211	5-7	9
4	Думпкар 6-ВС-60	216	15-20	0
5	Думпкар 6-ВС-60	216	10-15	7
6	Думпкар 6-ВС-60	216	5-10	10

На всіх ділянках були укладені рейки типу Р65, еюра шпал – 1840 шт./км.

Вертикальні навантаження на шпали визначалися за допомогою силомірних підкладок, які заздалегідь були протаровані на гідравлічному пресі.

При виконанні експериментальних робіт визначалися вертикальні переміщення рейок і вертикальні переміщення шпал за допомогою відеоцифрової системи визначення переміщення [3].

На кожній досліджуваній ділянці було випробувано не менше 20 шпал.

На рис. 1, як приклад, наведені пружні характеристики скріплення ДО при навантаженні вертикальною силою і при подальшому розвантаженні. Характеристики одержані в результаті обробки даних експерименту на ділянці №4 при русі думпкара 6-ВС-60 із швидкістю 12,5 км/год (3,47 м/с). Максимальне навантаження на вузол скріплення склало 49,7 кН.

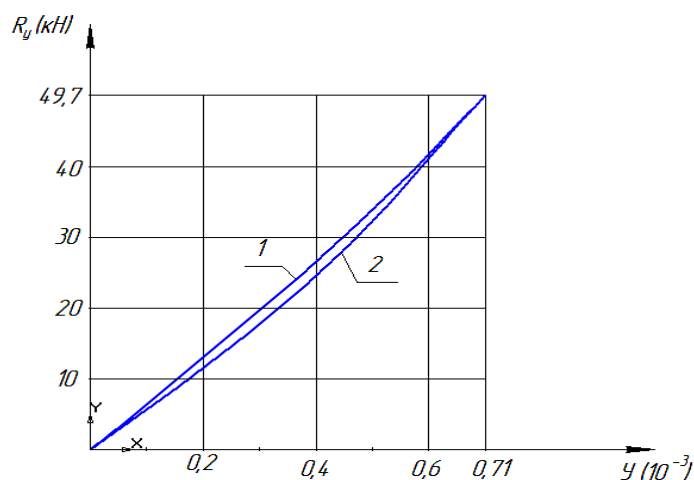


Рис. 1. Вертикальні пружні характеристики скріплення ДО при русі думпкара 6-ВС-60: 1 – при навантаженні скріплення; 2 – при розвантаженні

Вертикальні пружні характеристики скріплення ДО близькі до лінійних. Максимальні вертикальні пружні переміщення в скріпленні склали в даному випадку 0,71 мм, вертикальна жорсткість – $7,02 \cdot 10^4$ кН/м.

Коефіцієнт постелі підкладки розраховувався на підставі дослідних даних як, кН/м^3 ,

$$C_{\text{пост}} = \frac{\Delta R_y}{\Delta y \cdot \omega_{\text{п}}}, \quad (1)$$

де ΔR_y – змінення вертикальних навантажень на скріплення в робочому діапазоні (кН);

Δy – змінення вертикальних пружних деформацій y в скріпленні, відповідних робочому діапазону навантажень, м;

$\omega_{\text{п}}$ – площа підкладки скріплення ДО, м^2 .

Виконані експериментальні роботи показали, що в процесі експлуатації коефіцієнт постелі підкладки знижується. Це можна пояснити змінами механічних характеристик деревини шпали в результаті процесів деструктуризації целюлози, процесів гниття деревини, змін її вогкості і ряду інших. Аналіз впливу експлуатаційних чинників колії на коефіцієнт постелі підкладки, виконаний з використанням коефіцієнтів кореляції, показав, що головним чинником є термін служби колії.

На рис. 2 наведено графік залежності коефіцієнта постелі підкладки від термінів служби колії, одержаний на підставі даних проведених експериментів.

Ця залежність апроксимована показовою функцією, емпіричні коефіцієнти якої одержані методом найменших квадратів з використанням вбудованої функції табличного процесора Excel.

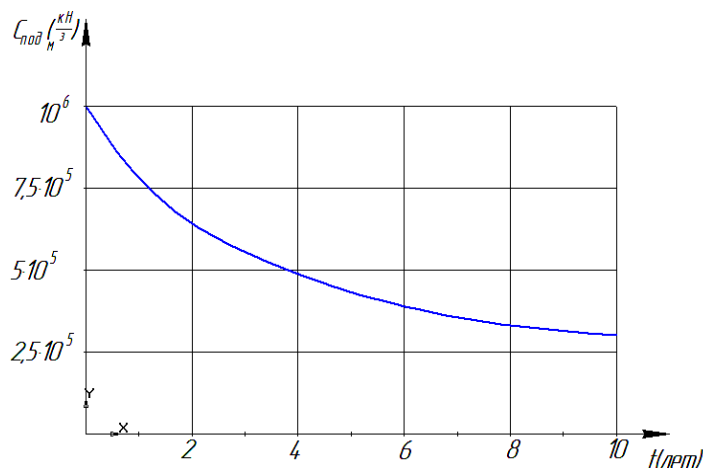


Рис. 2. Графік залежності коефіцієнта постелі підкладки від термінів експлуатації колії

Отримана емпірична залежність має вигляд, кН/м^3 ,

$$C_{\text{под}} = 9,996 \cdot 10^5 - 3,955 \cdot 10^5 t^{0,204}. \quad (2)$$

Слід зазначити про значний розкид даних, одержаних у результаті цих експериментів. Так, значення вертикальних пружних деформацій скріплення ДО, одержані для однакових значень вертикального навантаження, яке було визначено на шпалах однієї партії і укладених на одній рейковій ланці, могли відрізнятись на 20 % і більше. Мабуть, це пояснюється широким діапазоном, у якому змінюються механічні характеристики деревини шпал. Для рівняння (2) середня помилка апроксимації складає 16,4 %.

Залежність зміни коефіцієнта постелі підкладки від терміну служби колії дозволяє одержати, використовуючи рівняння, які отримані в статті [1], функції зміни жорсткостей скріплення ДО при вертикальному вигині і при крученні рейки в процесі експлуатації:

$$\left. \begin{aligned} C_y &= 6,24 \cdot 10^4 - 2,47 \cdot 10^4 t^{0,204} \text{ (кН / м)} \\ C_\varphi &= 495,5 - 196,06 t^{0,204} \text{ (кН} \cdot \text{м / рад)} \end{aligned} \right\} \cdot (3)$$

Для визначення жорсткості костилів при їх поперечному віджиманні, узгодження роботи яких визначає жорсткість скріплення ДО при горизонтальних поперечних вигинах рейки, був використаний пристрій, загальний вигляд якого наведено на рис. 3.

Пристрій складається з рамки 1 має спеціальні відгини 2, за допомогою яких захоплюється головка і подошва рейки з боку осі колії. Навантаження на торець шпали задавалося гідравлічним домкратом ДГ-5, шток якого упирався в торець шпали, а основа – у приварену до рамки пластину 3. Значення навантаження фіксувалися за манометром, вмонтованим у циліндр домкрата. Переміщення шпали щодо подошви рейки визначалися індикатором ІЧ-10.

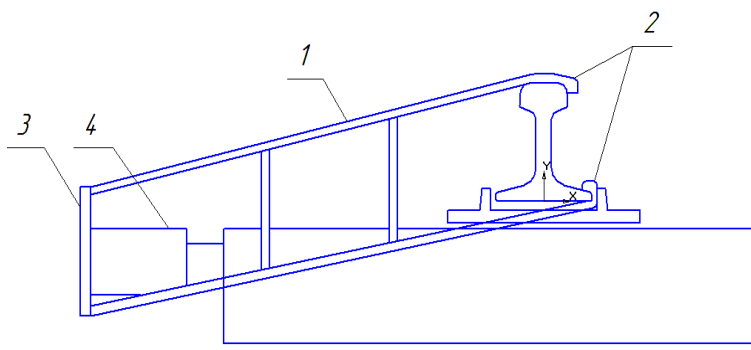


Рис. 3. Прилад для визначення поперечних переміщень шпали:
1 – рамка; 2 – захоплювачі; 3 – пластина; 4 – домкрат

Перед початком дослідження костилі добивалися, баласт у торця шпали відкопувався на глибину 10 см. Для виключення впливу сил тертя шпали по баласту рейкову нитку вивішували на висоту 15-20 мм двома домкратами ДГП-8. Після цього на шпалу встановлювався пристрій, домкрат, індикатор переміщення і починалися випробування.

Навантаження на шпалу прикладалося східчасто по 5 кН до досягнення переміщень шпали 0,6 мм, що є реальними переміщеннями підшви рейки в колії при русі в кривій радіусом 350 м екіпажа з осьовими навантаженнями більше 343 кН

[2]. Достатнім виявлявся рівень навантажень, як правило, 38-40 кН для нових шпал і 20-25 кН для старопридатних.

Випробування були проведені на восьми ділянках, експлуатаційні характеристики яких наведено в табл. 2. На кожній ділянці було випробувано не менше 25 шпал.

На рис. 4 наведено, як приклад, пружні характеристики скріплення ДО при горизонтальному вигині рейки, одержані на підставі статистичної обробки даних дослідів на ділянках №1 і №4 (термін служби колії 2 і 10 років відповідно).

Таблиця 2

Характеристики досліджуваних ділянок для визначення параметрів вертикальної жорсткості костилів при віджиманні

№ ділянки	Тип рухомого складу	Осьове навантаження, кН	Швидкість руху, км/год	План лінії	Термін служби колії, роки
1	2	3	4	5	6
1	Чавуновоз 50 т	201	<5	Пр	2
2	Чавуновоз 50 т	201	<5	Кр R300 м	7
3	Шлаковоз 11 м ³	211	5-10	Кр R650 м	5
4	Шлаковоз 11 м ³	211	5-10	Пр	10
5	Візки для ізложниць	346	<3	Пр	6
6	Візки для ізложниць 4-120-550	346	<3	Пр	8
7	Платформа чавуновоза 70 т	245	5-10	Кр R450 м	0
8	Платформа чавуновоза 70 т	245	5-10	Пр	12

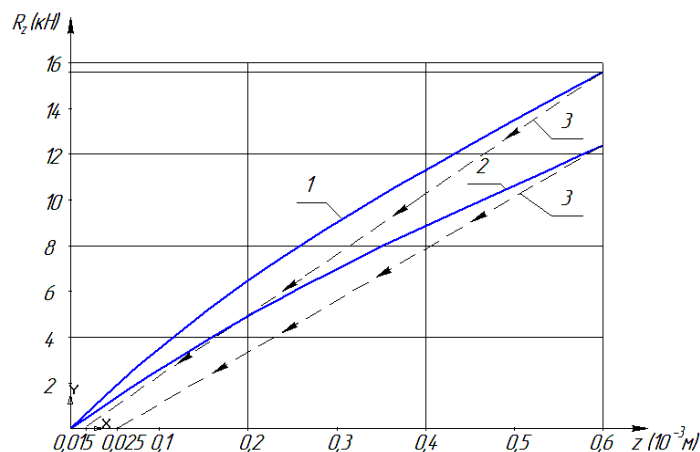


Рис. 4. Пружні характеристики скріплення ДО при бокових переміщеннях шпал:
 1 – термін служби колії 2 роки; 2 – термін служби колії 10 років;
 3,4 – пружні характеристики при розвантаженні скріплень

Вплив експлуатаційних чинників колії на величини жорсткостей скріплення ДО при горизонтальному вигині рейки C_z оцінювався коефіцієнтами кореляції. Най-

значущим є термін служби колії. У процесі експлуатації жорсткість C_z зменшується, залежність цієї величини від терміну служби нелінійна (рис. 5).

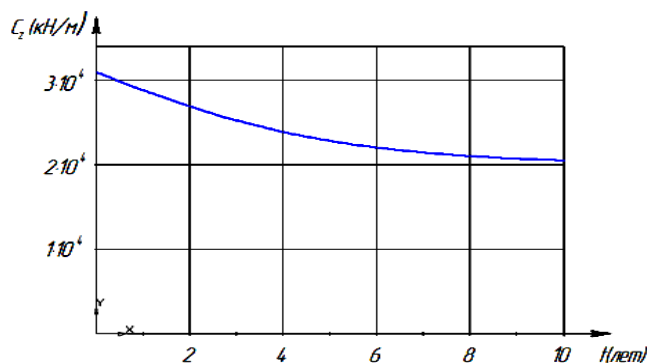


Рис. 5. Графіки залежності горизонтальної поперечної жорсткості скріплення ДО від терміну експлуатації колії

Ця залежність була апроксимована показовим рівнянням, kH/m ,

$$C_z = 3,15 \cdot 10^4 - 0,604 \cdot 10^4 t^{0,191}, \quad (4)$$

де t – термін експлуатації колії, роки.

Середня помилка апроксимації для рівняння (4) складає 7,8 %.

Вплив інших експлуатаційних чинників на горизонтальну поперечну жорсткість виявити не вдалося.

Висновок. Таким чином, на підставі проведених на коліях підприємств промислового транспорту експериментальних досліджень встановлено параметри жорсткості елементів проміжних скріплень типу ДО, які дозволяють отримувати значення просторових жорсткостей цього скріплення залежно від рівня діючих навантажень і термінів експлуатації колії.

Список літератури

1. Даренський, О.М. Математична модель просторових жорсткостей скріплення типу ДО [Текст] / О.М. Даренський // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2013. – Вип. 136 – С. 227-231.
2. Даренський, О.М. Результати експериментальних досліджень роботи залізничного пути промислового транспорту [Текст] / О.М. Даренський // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2011. – Вип. 125. – С. 35-45.
3. Система для вимірювання переміщень в елементах інженерних конструкцій і споруд під дією навантажень [Текст]: пат. №70477 України, МПК // ГОДД 51500; У01 У 35100 / Даренський О.М., Астахов В.М., Вітольберг В.Г., Бугаєць Н.В., Беліков Є.А.; заявник і патентовласник Українська державна академія залізничного транспорту. – № 4. – 2011 14768; заявл. 13.12.2011; опубл. 11.02.2012, Бюл. №11. – 5 с.

Ключові слова: параметри жорсткості проміжних скріплень типу ДО.

Анотація

Наведено результати експериментальних досліджень параметрів жорсткостей елементів проміжних скріплень типу ДО, які отримані для умов промислового залізничного транспорту.

Приведены результаты экспериментальных исследований параметров жесткостей элементов промежуточных скреплений типа ДО, полученных для условий промышленного железнодорожного транспорта.

The experimental results hardness intermediate fastening elements such as DO, obtained for an industrial railway.

УДК 624.072.3

*Доценти Г.Л. Ватуля, Е.И. Галагура,
асп. Д.Г. Петренко*

*G. Vatulya, E. Galagurya,
D. Petrenko*

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
КОНСТРУКЦИЙ С ПОМОЩЬЮ ГЛУБИННЫХ ДАТЧИКОВ**

**DETERMINATION OF STRUCTURES MECHANICAL
CHARACTERISTICS WITH DEEP SENSORS**

Представил д-р хим. наук, профессор А.Н. Плугин

Введение. Свойства материалов при расчетах на прочность, жесткость и устойчивость определяются механическими

характеристиками. Величины механических характеристик могут быть получены в лабораторных условиях доведением

образцов до разрушения или чрезмерной деформации.

В настоящее время возникают трудности при определении механических характеристик конструкций экспериментальным путем, которые находятся в сложном напряженно-деформированном состоянии. Сложность определения деформаций бетонного ядра сталебетонной колонны вызвана тем, что бетонное ядро находится в состоянии трехосного сжатия.

В данной статье приведены результаты испытания бетонных кубиков с размерами ребер $100 \times 100 \times 100$ мм под воздействием кратковременного статического нагружения с использованием глубинных датчиков. В ходе экспериментальных исследований были получены значения деформации бетонных кубиков по показаниям наружных и внутренних тензодатчиков.

Применение в экспериментальных исследованиях тензорезисторов позволяет следить за развитием деформаций, а также судить об их линейной либо нелинейной зависимости. Однако расположение тензорезисторов с внешней стороны опытного образца позволяет определить деформации только на поверхности конструкции. Для более детального изучения развития деформаций в образцах внутри бетонных кубиков были размещены глубинные датчики, чтобы экспериментально решить задачу об изменении деформаций в предельном состоянии.

Как показали исследования [1], применение такого типа глубинного датчика дает хорошую сходимость экспериментальных и теоретических данных.

Глубинные тензодатчики были изготовлены по следующей технологии. В сборно-разборную металлическую формочку (ячейка для изготовления каждого датчика имеет размер $100 \times 10 \times 5$

мм), смазанную солидолом, укладывался слой мастики толщиной 2,5 мм. Мастика состояла из смеси клея БФ-2 с цементом в соотношении 1:2. После ее высыхания (в течение 24 ч) на нее наклеивались тензодатчики серии BF100-20AA-A(11)-BX, на которые в свою очередь наносился второй слой мастики. Свободными оставались только участки головки датчика с выводами. После того как к выводам были подпаяны провода, осуществлялось изолирование этой части датчика. После термической обработки в сушильном шкафу при температуре 150° в течение 1 ч датчики извлекались из формочки.

Для проведения экспериментальных исследований было изготовлено шесть опытных образцов. Глубинные датчики помещались в формочки во время бетонирования. Формы для кубиков заполнялись бетоном наполовину, вибрировались, затем укладывался глубинный тензодатчик, остальная часть формы заполнялась бетоном и снова вибрировалась. Испытания кубиков проводились на 30 день после бетонирования.

Бетонные кубики (класса бетона С10/12) испытывались на гидравлическом прессе ПММ-250 в лаборатории кафедры «Строительная механика и гидравлика» УкрГАЖТ.

К образцам прикладывалась осевая нагрузка. В процессе испытания измерялись продольные деформации. Для этого на грани кубиков в продольном направлении наклеивались тензодатчики. Глубинный тензодатчик размещался также в продольном направлении внутри кубика.

Показания тензодатчиков снимали с помощью тензоцентрической станции ВВП-8. Нагрузку прикладывали по 20 кН в интервале от 0 до $0,8F_{\text{разруш}}$. Отсчеты по приборам снимались на каждой ступени нагрузки. Все образцы доводились до разрушения.

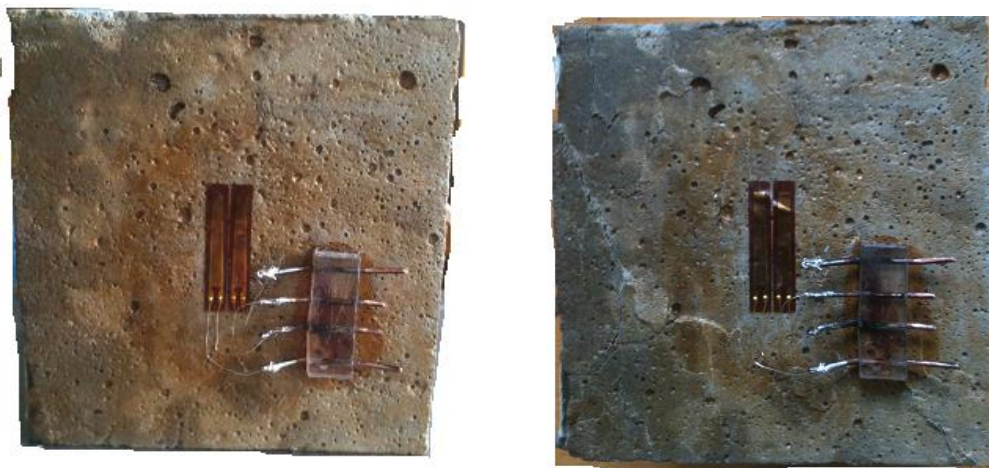


Рис. 1. Внешний вид бетонных кубиков до и после испытаний

Как известно, в бетоне даже при малых напряжениях, кроме упругих, развиваются и пластические деформации. Зависимость деформаций от напряжений выражается для него кривой линией. Поэтому отношение представляет собой переменную величину. Геометрически модуль деформации – тангенс угла наклона касательной к кривой, выражающей зависимость между деформациями и напряжениями.

Вследствие разнообразия свойств бетонов, влияния размеров образцов, влияния влажности бетона, зависимости деформаций от скорости нагружения и условности измерения предельной деформации, предшествующей разрушению, результаты экспериментальных данных разных исследователей различны, особенно в части определения предельной величины деформации.

Для установления связи между напряжениями и деформациями вводят величины: $E_{ск}$ – модуль упругости (начальный модуль деформаций); E_{cd} – расчетное значение модуля упругости.

Приближенно $E_{ск}$ и ε_c можно определять по формулам Л.И. Онищика:

$$E_{cd} = E_{ck} \cdot \left(1 - \frac{\sigma}{1,1 \cdot f_{cm}}\right); \quad (1)$$

$$\varepsilon_c = \frac{1,1 \cdot f_{cm}}{E_{ck}} \ln\left(1 - \frac{\sigma}{1,1 \cdot f_{cm}}\right). \quad (2)$$

Значения начальных модулей упругости при сжатии бетона $E_{ск}=E_c$ равны отношению нормального напряжения σ к относительной деформации ε при величине $\sigma < 0,2f_{ст}$. С ростом напряжений в бетоне величина модуля деформации уменьшается. При напряжениях $\sigma < 0,5f_{ст}$ упругая деформация составляет обычно более 0,8 полной деформации. В наших экспериментальных исследованиях принимаем, что в пределах от 0 до $\sigma < 0,5f_{ст}$ зависимость между деформациями и напряжениями линейная. Из этого следует, что ε_c можно определить по формуле

$$\varepsilon_c = \frac{\sigma}{E_{cd}}. \quad (3)$$

Продольные деформации замерялись также с помощью индикаторов часового типа.

Как видно на рис. 2, на первых этапах нагружения зависимости теоретических продольных деформаций от нагрузки близки к линейным. Далее линейность нарушается и при нагрузках 0,5 от разрушающей наблюдается интенсивный рост продольных. На рис. 3 показаны зависимости продольных деформаций от нагрузки по показаниям тензометрической базы.

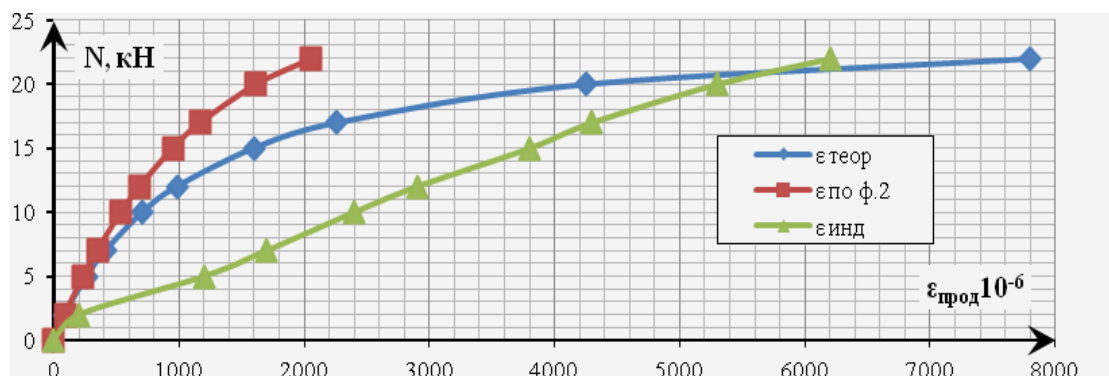


Рис. 2. Графики изменения теоретических продольных деформаций

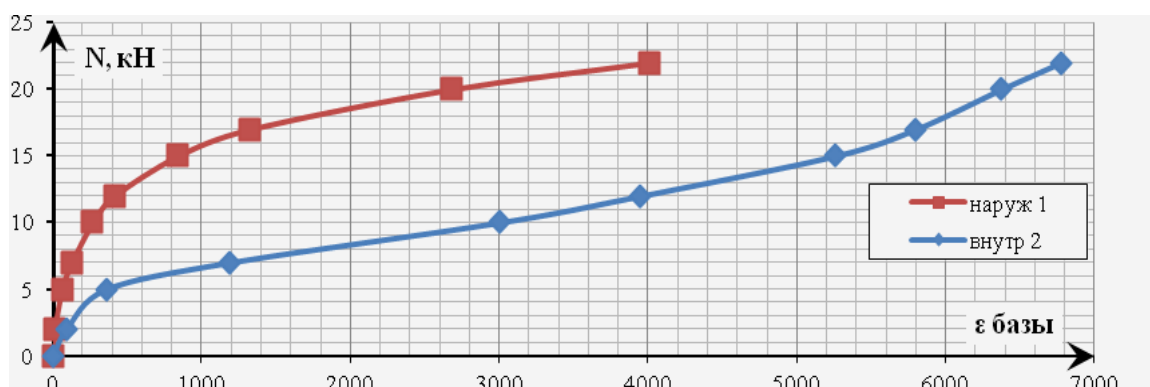


Рис. 3. Графики изменения продольных деформаций по показаниям тензометрической базы

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что показания наружного тензорезистора имеют схожую зависимость с теоретическими продольными деформациями, которые определяются по формулам (2) и (3). Показания глубинного тензодатчика имеют схожую зависимость с показаниями индикатора часового типа. Таким образом, можно сделать вывод, что продольные деформации внутри бетонного кубика отличаются от продольных деформаций на его гранях.

По полученным теоретическим и экспериментальным данным были рассчитаны коэффициенты перевода показаний тензометрической базы к

значениям продольных деформаций (рис. 4). В виду того, что зависимость деформаций от нагрузки носит нелинейный характер, коэффициент перевода также изменяется по нелинейной зависимости.

Выводы. В результате испытания бетонных кубиков были получены данные о характере развития продольных деформаций на поверхности и внутри бетона на различных этапах нагружения.

Проведенные экспериментальные исследования позволили сопоставить развитие продольных деформаций на поверхности и внутри бетонного кубика. Получены коэффициенты перевода показаний тензометрической базы к значениям продольных деформаций.

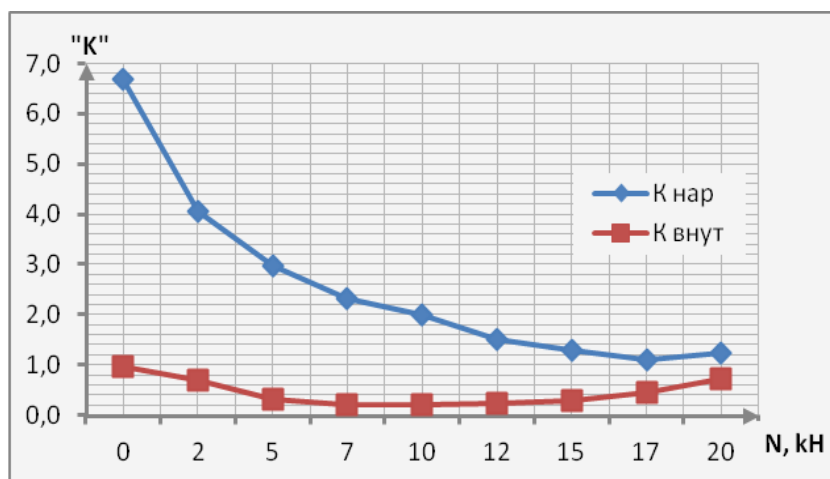


Рис. 4. Графики изменения коэффициента перевода

Список литературы

1. Красновский, Р.О. О методике испытания железобетонных балок на действие поперечных сил [Текст] / Р.О. Красновский // Методика лаб. исследований деформаций и прочности бетона, арматуры и ж.-б. конструкций. – М.: Госстройиздат, 1962. – С. 160-173.
2. Берг, О.Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона [Текст] / О.Я. Берг. – М.: Госстройиздат, 1962. – 96 с.
3. ДСТУ Б В.2.7-215:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Правила підбору складу [Текст]. – Введ. 22.12.2009. – К.: НДІБК, 2009. – 13 с.
4. ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками [Текст]. – К.: НДІБК, 2009. – 43 с.

Ключевые слова: модуль упругости, деформации, глубинный тензодатчик.

Аннотации

Проведено експериментальні дослідження бетонних кубиків з використанням глибинних тензодатчиків. Отримано дані про характер розвитку поздовжніх деформацій на поверхні і усередині матеріалу на різних етапах навантаження.

Проведены экспериментальные исследование бетонных кубиков с использованием глубинных тензодатчиков. Получены данные о характере развития продольных деформаций на поверхности и внутри материала на различных этапах нагружения.

The authors provide the experimental researches of cube concrete test specimen with subsurface strain gauges. The data about the nature of the longitudinal strain on the surface and within the material at different stages of loading.

УДК 624.016.001.2

*Кандидати техн. наук Ю.П. Китов,
М.А. Веревичева*

*Y.P. Kitov,
M.A. Verevicheva*

ОПТИМИЗАЦИЯ СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМЫХ БАЛОК ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ

OPTIMIZATION OF THE STATICALLY INDEFINABLE BEAMS OF VARIABLE SECTION

Представил д-р техн. наук, профессор А.Н. Даренский

Постановка задачи в общем виде.

Одним из направлений развития современного строительства является внедрение в строительную практику эффективных видов строительных конструкций. В связи с этим большое распространение получила практика оптимизации конструктивных решений. Как показывают исследования [1-3], ограничения задач оптимизации статически неопределимых ферм, балок и рам являются нелинейными, а сами задачи могут иметь несколько оптимальных решений, которые существенно различаются по массе или стоимости. В связи с этим разработка теории и эффективных методов решения многоэкстремальных задач оптимизации стержневых систем является актуальной проблемой проектирования строительных конструкций.

Обзор последних исследований. В настоящее время накоплен значительный опыт постановки и решения задач оптимизации строительных конструкций с использованием математических методов [4-6]. В частности, обобщение вариационных методов Лагранжа и Кастильяно применительно к задачам оптимального проектирования стержневых систем приводятся в работе [4];

градиентные методы, метод Ньютона и другие применительно к задачам оптимизации строительных конструкций описаны в работе [5]. Приложения известных методов к решению задач, возникающим в современном строительстве, предлагаются в работе [6].

Цель исследований. Каждый из известных методов позволяет решать широкий класс задач. Однако при оптимизации каждой конструкции возникает необходимость общие методы адаптировать к конкретной задаче.

В данной работе на примере одной частной задачи продемонстрирован способ выбора оптимального решения, в котором известный аналитический метод совмещается с численными оценками. Такая методика удобна в практических приложениях.

Постановка задачи. В качестве примера оптимального проектирования рассмотрим однопролетную статически неопределимую балку переменного сечения, нагруженную постоянной нагрузкой q (рис. 1). На участке $[0, x]$ высота сечения равна h_1 , на участке $[x, l]$ высота h_2 . Ширина сечения равна b ; принимается максимальное соотношение $b = h_2/5$.

Требуется найти соотношение балки V . Таким образом, функцией цели является $\xi = x/l$, обеспечивающее минимум объема

$$V = bl[\xi h_1 + (1 - \xi)h_2] = \frac{h_2}{5}l[\xi h_1 + (1 - \xi)h_2]. \quad (1)$$

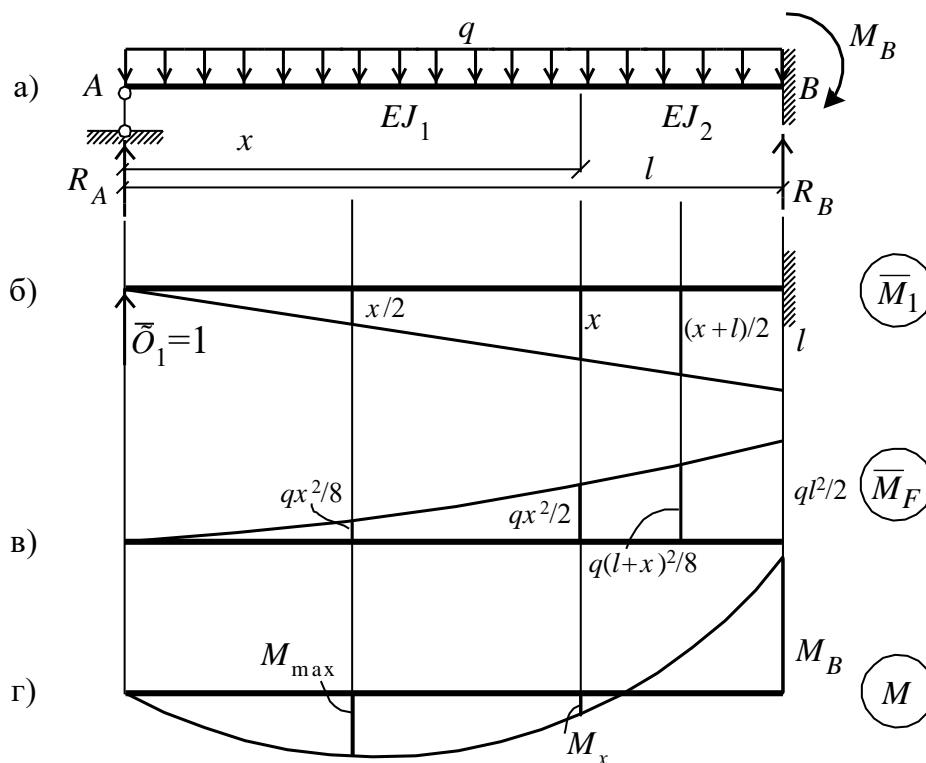


Рис. 1. Расчетная схема балки (а); единичная и грузовая эпюры изгибающих моментов (б, в); эпюра изгибающих моментов в заданной системе (г)

Выразим высоты h_1 и h_2 из условия равнопрочности участков балки разной жесткости, то есть потребуем выполнения условий

$$\frac{M_{\max}}{bh_1} \leq [\sigma], \quad \frac{M_x}{bh_1} \leq [\sigma], \quad \frac{|M_B|}{bh_2} = [\sigma].$$

Для этого найдем изгибающие моменты, воспользовавшись методом сил (рис. 1):

$$M = \bar{M}_1 X_1 + M_F,$$

$$\Delta_{1F} = -\frac{ql^4}{8EJ_2} \left[n\xi^4 + (1 - \xi)(\xi^3 + \xi^2 + \xi + 1) \right],$$

$$\delta_{11} = -\frac{l^3}{3EJ_2} \left[n\xi^3 + (1 - \xi)(\xi^2 + \xi + 1) \right],$$

$$X_1 = -\frac{\Delta_{1F}}{\delta_{11}} = \frac{3ql\xi}{8} \frac{n + s}{n + k},$$

где n – соотношение жесткостей участков балки,

$$n = \frac{J_2}{J_1} = \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^3;$$

$$s = \frac{1}{\xi^4} - 1, \quad k = \frac{1}{\xi^3} - 1.$$

Найдем изгибающие моменты в характерных сечениях:

экстремальный момент

$$M_{\max} = \frac{9ql^2}{128} \left(\xi \frac{n+s}{n+k} \right)^2; \quad (2)$$

наибольший момент

$$|M_B| = \frac{ql^2}{8} \left(4 - 3\xi \frac{n+s}{n+k} \right); \quad (3)$$

В месте изменения размеров сечения

$$M_x = \frac{ql^2}{8} \xi^2 \left(3 \frac{n+s}{n+k} - 4 \right). \quad (4)$$

Подберем сечения на двух участках.

Из условий прочности высота сечения на первом участке $[0, x]$ с учетом принятого соотношения $b = h_2/5$ будет большей из двух:

$$h_1 = \max(h_{11}, h_{12}),$$

где

$$h_{11} = \sqrt{\frac{6M_{\max}}{bmR_y}} = \frac{3l}{8} \sqrt{\frac{3q}{bmR_y} \frac{n+s}{n+k}} \xi = \frac{3l}{8} \sqrt{\frac{15q}{mR_y} \frac{n+s}{n+k}} \xi \sqrt{\frac{1}{h_2}}; \quad (5)$$

$$h_{12} = \sqrt{\frac{6|M_{\xi}|}{bmR_y}} = \frac{l}{2} \sqrt{\frac{15q}{mR_y} \xi \frac{n+s}{n+k}} \sqrt{4 - 3 \frac{n+s}{n+k}} \sqrt{\frac{1}{h_2}}. \quad (6)$$

На втором участке $[x, l]$ из условия прочности

$$h_2 = \frac{l}{2} \sqrt{\frac{3q}{bmR_y}} \sqrt{4 - 3\xi \frac{n+s}{n+k}} = \frac{l}{2} \sqrt{\frac{15q}{mR_y}} \sqrt{4 - 3\xi \frac{n+s}{n+k}} \sqrt{\frac{1}{h_2}}. \quad (7)$$

Введем обозначения:

$$h_2 = \alpha \sqrt[3]{4 - 3\xi\gamma}. \quad (8)$$

$$a = \frac{l}{2} \sqrt{\frac{3q}{bmR_y}} = \text{const}, \quad \alpha = \sqrt[3]{a^2},$$

Подставляем выражение (8) в выражения (5) и (6):

$$\gamma = \frac{n+s}{n+k} = \gamma(n(\xi), \xi).$$

$$h_{11} = \frac{3}{4} a \xi \gamma \frac{1}{\sqrt[6]{4 - 3\xi\gamma}}, \quad (9)$$

Из формулы (7) с учетом обозначений получаем

$$h_{12} = a \xi \gamma \frac{\sqrt{4 - 3\gamma}}{\sqrt[6]{4 - 3\xi\gamma}}. \quad (10)$$

Из формул (8) – (10) видно, что высоты h_{11}, h_{12}, h_2 являются функциями $n(\xi), \xi$:

$$h_i = h_i(n(\xi), \xi), i = 1, 2. \quad (11)$$

Таким образом, минимизируемая функция объема также является функцией от $n(\xi), \xi$:

$$V = V(n(\xi), \xi). \quad (12)$$

Оптимизация объема. Минимум функции (1) достигается при условии

$$\frac{dV}{d\xi} = \frac{h_2}{5} l \left[h_1 + \xi \frac{dh_1}{d\xi} - h_2 + (1 - \xi) \frac{dh_2}{d\xi} \right] + \frac{1}{5} \frac{dh_2}{d\xi} l [\xi h_1 + (1 - \xi) h_2] = 0,$$

т. е.

$$h_2 \left[h_1 + \xi \frac{dh_1}{d\xi} - h_2 + (1 - \xi) \frac{dh_2}{d\xi} \right] + \frac{dh_2}{d\xi} [\xi h_1 + (1 - \xi) h_2] = 0. \quad (13)$$

Чтобы найти из уравнения (11) оптимальное значение ξ (и тем самым n), нужно сначала выразить через ξ производные $\frac{dh_1}{d\xi}$ и $\frac{dh_2}{d\xi}$. Приняв для h_1 и h_2 общее обозначение h , производные ищем в виде [7]:

$$\frac{dh(n(\xi), \xi)}{d\xi} = \frac{\partial h}{\partial n} \frac{\partial n}{\partial \xi} + \frac{\partial h}{\partial \xi}. \quad (14)$$

Все частные производные в этом выражении, кроме $\frac{\partial n}{\partial \xi}$, определяются из формул (8) – (10). Поскольку функция $n(\xi)$ выражается через ξ неявным образом, для определения $\frac{\partial n}{\partial \xi}$ (в нашем случае $\frac{\partial n}{\partial \xi} \equiv \frac{dn}{d\xi}$) воспользуемся формулой дифференцирования неявной функции [7].

Определение производной $\frac{dn}{d\xi}$.

Проведем некоторые преобразования формул (8) – (10).

Из соотношения $n = \frac{J_2}{J_1} = \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^3$ получаем

$$h_1(\xi, n) = \frac{h_2(\xi, n)}{\sqrt[3]{n}},$$

$$\frac{h_2}{\sqrt[3]{n}} - \frac{3}{4} \alpha \xi \gamma \frac{1}{\sqrt[6]{4 - 3\xi\gamma}} = 0. \quad (15)$$

Согласно формуле (8) заменяем в формуле (15) h_2 :

$$\alpha \sqrt[3]{4 - 3\xi\gamma} \frac{1}{\sqrt[3]{n}} - \frac{3}{4} \alpha \xi \gamma \frac{1}{\sqrt[6]{4 - 3\xi\gamma}} = 0.$$

Введя обозначение

$$F_{11}(n(\xi), \xi) = \sqrt[3]{\frac{4 - 3\xi\gamma}{n}} - \frac{3}{4} \xi \gamma \frac{1}{\sqrt[6]{4 - 3\xi\gamma}},$$

получаем выражение $n(\xi)$ в неявном виде:

$$F_{11}(n(\xi), \xi) = \sqrt[3]{\frac{4-3\xi\gamma}{n}} - \frac{3}{4}\xi\gamma \frac{1}{\sqrt[6]{4-3\xi\gamma}} = 0. \quad (16)$$

Аналогично получаем выражение для $n(\xi)$, используя формулу (9) для h_{12} :

$$F_{12}(n(\xi), \xi) = \sqrt[3]{\frac{4-3\xi\gamma}{n}} - \xi \frac{\sqrt{4-3\gamma}}{\sqrt[6]{4-3\xi\gamma}} = 0. \quad (17)$$

Согласно работе [7]

$$\frac{dn}{d\xi} = - \frac{\partial F_1}{\partial \xi} / \frac{\partial F_1}{\partial n} \quad (18)$$

($F_1 = F_{11}$ или $F_1 = F_{12}$).

Берем нужные для вычисления $\frac{dn}{d\xi}$

производные, вводя для компактности некоторые обозначения:

$$f_1 = \xi\gamma, \quad \gamma = \gamma(n(\xi), \xi),$$

$$f_2 = 4 - 3\xi\gamma = 4 - 3f_1,$$

$$f_3 = \sqrt[3]{4 - 3\xi\gamma} = \sqrt[3]{f_2},$$

$$f_4 = \sqrt[6]{4 - 3\xi\gamma} = \sqrt[6]{f_2},$$

$$f_5 = \sqrt[3]{\frac{f_2}{n}},$$

$$f_6 = 4 - 3\gamma,$$

$$f_7 = \xi\sqrt{4 - 3\gamma} = \xi\sqrt{f_6}.$$

Тогда функции F_{ij} и их производные равны:

$$F_{11} = f_5 - \frac{3}{4}\xi\gamma \frac{1}{f_4} = f_5 - \frac{3}{4}\frac{f_1}{f_4},$$

$$F_{12} = f_5 - \xi \frac{\sqrt{f_6}}{f_4} = f_5 - \frac{f_7}{f_4},$$

$$\frac{\partial F_{11}}{\partial n} = f'_{5n} - \frac{3}{4}\xi \frac{\gamma'_n f_4 - \gamma f'_4 n}{f_3}, \quad (19)$$

$$\frac{\partial F_{11}}{\partial \xi} = f'_{5\xi} - \frac{3}{4} \frac{f'_1 \xi f_4 - f_1 f'_4 \xi}{f_3}, \quad (20)$$

$$\frac{\partial F_{12}}{\partial n} = f'_{5n} - \xi \frac{\frac{1}{2\sqrt{f_6}} f'_6 n f_4 - \sqrt{f_6} f'_4 n}{f_3}, \quad (21)$$

$$\frac{\partial F_{12}}{\partial \xi} = f'_{5\xi} - \frac{f'_7 \xi f_4 - f_7 f'_4 \xi}{f_3}, \quad (22)$$

где

$$f'_{2n} = -3\xi\gamma'_n, \quad f'_{4n} = \frac{1}{6}f_2^{-5/6}f'_{2n}, \quad f'_{5n} = \frac{1}{3}\left(\frac{f_2}{n}\right)^{-2/3} \frac{f'_{2n}n - f_2}{n^2}, \quad f'_{6n} = -3\gamma'_n,$$

$$f'_{1\xi} = \gamma + \xi\gamma'_{\xi}, f'_{2\xi} = -3f'_{1\xi}, f'_{3\xi} = \frac{1}{3}f_2^{-2/3}f'_{2\xi},$$

$$f'_{4\xi} = \frac{1}{6}f_2^{-5/6}f'_{2\xi}, f'_{5\xi} = \frac{1}{3}\left(\frac{f_2}{n}\right)^{-2/3}\frac{f'_{2\xi}}{n}, f'_{6\xi} = -3\gamma'_{\xi}, f'_{7\xi} = \sqrt{f_6} + \xi\frac{f'_{6\xi}}{2\sqrt{f_6}},$$

$$\gamma'_{\xi} = \frac{s'(n+k) - k'(n+s)}{(n+k)^2}, \quad \gamma'_n = \frac{k-s}{(n+k)^2},$$

$$s' = -\frac{4}{\xi^5}, \quad k' = -\frac{3}{\xi^4}.$$

Пользуясь формулами (19) – (22), из формулы (18) определяем $\frac{dn}{d\xi}$ при

$F_1 = F_{11}$ (т. е. при $h_1 = h_{11}$) и при $F_1 = F_{12}$ (т. е. при $h_1 = h_{12}$).

Определение частных производных

$\frac{\partial h}{\partial n}, \frac{\partial h}{\partial \xi}$ (для формулы (14)). Дифференцируем (8) – (10), пользуясь введенными обозначениями:

$$h_{11} = \frac{3}{4}\alpha\xi\gamma\frac{1}{f_4} = \frac{3}{4}\alpha\frac{f_1}{f_4},$$

$$h_{12} = \alpha\frac{\xi\sqrt{f_6}}{f_4} = \alpha\frac{f_7}{f_4},$$

$$h_2 = \alpha f_3,$$

$$\frac{\partial h_{11}}{\partial n} = \frac{3}{4}\alpha\xi\frac{\gamma'_n f_4 - \gamma f'_{4n}}{f_3}, \quad (23)$$

$$\frac{\partial h_{12}}{\partial n} = \alpha\xi\frac{\frac{1}{2\sqrt{f_6}}f'_{6n}f_4 - \sqrt{f_6}f'_{4n}}{f_3}, \quad (24)$$

$$\frac{\partial h_2}{\partial n} = \alpha\frac{1}{3}f_2^{-2/3}f'_{2n}, \quad (25)$$

$$\frac{\partial h_{11}}{\partial \xi} = \frac{3}{4}\alpha\frac{f'_{1\xi}f_4 - f_1f'_{4\xi}}{f_3}, \quad (26)$$

$$\frac{\partial h_{12}}{\partial \xi} = \alpha\frac{f'_{7\xi}f_4 - f_7f'_{4\xi}}{f_3}, \quad (27)$$

$$\frac{\partial h_2}{\partial \xi} = \alpha f'_{3\xi}. \quad (28)$$

Порядок формирования уравнений оптимизации. Разбиваем участок изменения ξ на заданное число интервалов, ограниченных точками ξ_1, ξ_2, \dots . Для каждой точки выполняем следующие действия:

– согласно формулам (16) и (17) (т. е. при $h = h_{11}$ и $h = h_{12}$) получаем табличные значения функции $n(\xi)$ в точках ξ_1, ξ_2, \dots методом половинного деления из уравнений

$$\sqrt[3]{\frac{4-3\xi\gamma}{n}} - \frac{3}{4}\xi\gamma\frac{1}{\sqrt[6]{4-3\xi\gamma}} = 0, \quad (29)$$

$$\sqrt[3]{\frac{4-3\xi\gamma}{n}} - \xi \frac{\sqrt{4-3\gamma}}{\sqrt[6]{4-3\xi\gamma}} = 0. \quad (30)$$

– определяем $\frac{\partial F_1}{\partial n}, \frac{\partial F_2}{\partial n}, \frac{\partial F_1}{\partial \xi}, \frac{\partial F_2}{\partial \xi}$

по формулам (19) – (22);

– определяем $\frac{dn}{d\xi}$ по формуле (18)

при $h = h_{11}$ и $h = h_{12}$;

– определяем h_{11}, h_{12}, h_2 (при $h = h_{11}$ и $h = h_{12}$) по формулам (8) – (10);

– определяем $\frac{\partial h_{11}}{\partial n}, \frac{\partial h_{11}}{\partial \xi}, \frac{\partial h_{12}}{\partial n},$

$\frac{\partial h_{12}}{\partial \xi}$ и $\frac{\partial h_2}{\partial n}, \frac{\partial h_2}{\partial \xi}$ при $h = h_{11}$ и $h = h_{12}$ по формулам (23) – (28);

– подставляя найденные величины в левую часть формулы (13), получаем значения производной минимизируемой

функции $\frac{dV}{d\xi}$ в точках ξ_1, ξ_2, \dots . Точку,

в которой производная изменяет знак, переходя через ноль, считаем точкой экстремума.

Пример решения задачи оптимизации. Рассчитывалась задача (1) при $l = 1200$ см, $q = 20$ кг/см, $mR_y = 2000$ кг/см². Значение ξ изменялось в интервале $0.75 \leq \xi \leq 0.9$.

Начальное значение объема $V_0 = 342879$ см³.

Результаты расчетов приведены в таблице; Δ – процент уменьшения объема по сравнению с начальным.

Таблица

ξ	n	$h_1, \text{ см}$	$h_2, \text{ см}$	$b, \text{ см}$	$V, \text{ см}^3$	Δ
0.818	4.32	25.51	41.80	8.36	285743	15.66

На рис. 2 приведены графики изменения объема (а) и его производной (б) в зависимости от ξ . Видно, что в интервале $0.818 \leq \xi \leq 0.825$ объем практически не изменяется, процент улучшения Δ изменяется на 0.01 %.

Выводы. В работе предложен способ оптимизации статически неопределимой балки переменного сечения с применением численных методов. Это обусловлено наличием неявно заданных функций, входящих в выражение для функции цели. Приведен алгоритм решения задачи по предложенной методике и приведен пример решения.

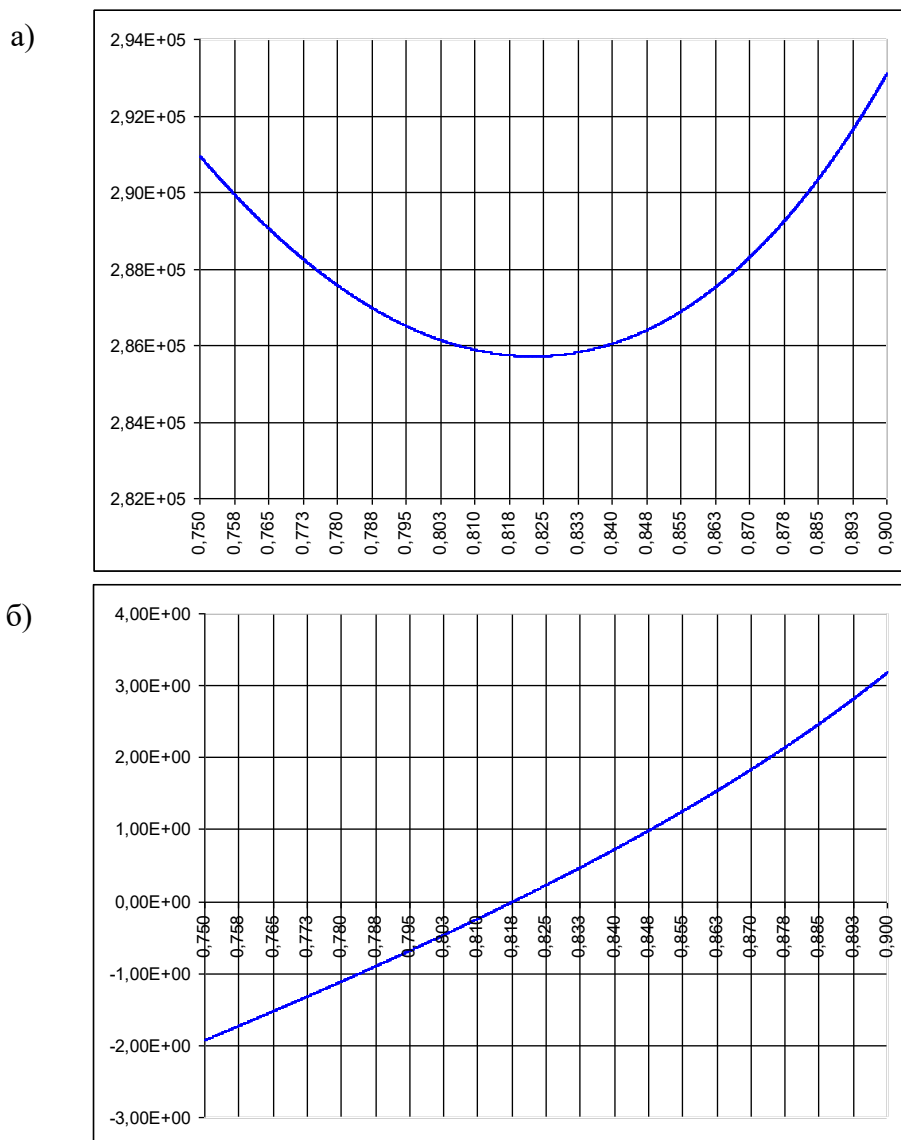


Рис. 2. Результат решения задачи: изменение объема (а) и его производной (б) в зависимости от соотношения ξ

Список литературы

1. Виноградов, А.И. Проблема оптимального проектирования в строительной механике [Текст] / А.И. Виноградов. – Харьков: Вища шк., 1973. – 168 с.
2. Лазарев, И.Б. Математические методы оптимального проектирования конструкций [Текст] / И.Б. Лазарев. – Новосибирск, 1974. – 191 с.
3. Китов, Ю.П. Применение динамического программирования к расчету оптимальных статически определимых ферм [Текст] / Ю.П. Китов, И.С. Храповицкий // Труды ХИИТ. – Харьков: ХИИТ, 1971. – Вып. 127. – С. 54-62.
4. Клюев, С.В. Оптимальное проектирование стержневых систем [Текст] / С.В. Клюев. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2007. – 130 с.
5. Волков, Е.А. Численные методы [Текст] / Е.А. Волков. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 248 с.

6. Новые направления оптимизации в проектировании строительных конструкций [Текст]: сб. статей / Белгород. гос. технолог. ун-т им. В.Г. Шухова; ред. А.Г. Юрьев. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2006. – 91 с.

7. Фихтенгольц, Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления [Текст] / Г.М. Фихтенгольц. – М.: Наука, 1970. – 608 с.

Ключевые слова: оптимизация, функция цели, статически неопределимая балка, переменное сечение, равнопрочность.

Аннотации

На прикладі оптимізації статично невизначної балки змінного перерізу продемонстровано спосіб вибору оптимального рішення, який поєднує аналітичні та чисельні оцінки, що є зручним у практичному використанні.

На примере оптимизации статически неопределимой балки переменного сечения продемонстрирован способ выбора оптимального решения, совмещающий аналитические и численные оценки, что удобно в практических приложениях.

On the example of optimizing of the statically indeterminate beam with variable cross sections show you how to select the best solutions, combining analytical and numerical estimates, which is useful in practical applications.

УДК 624.21

*Канд. техн. наук А.В. Лобяк (УкрГАЖТ),
гл. инж. В.В. Сердюк (ООО ПКИ «ЮжтрансНИИпроект»)*

A.V. Lobyak, V.V. Serduk

УТОЧНЕННАЯ МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ МОСТОВ ПРИ УСИЛЕНИИ НАКЛАДНОЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ПЛИТОЙ

IMPROVED METHODOLOGY OF BRIDGE SPANS MODELING BY STRENGTHENING REINFORCED CONCRETE SLABS

Представил д-р техн. наук, профессор А.А. Плугин

На сегодняшний день в Украине большая часть железнодорожных и автомобильных искусственных сооружений (мостов, путепроводов, эстакад и др.) не соответствуют современным условиям эксплуатации по грузоподъемности,

габаритам проезжей части и техническому состоянию [1]. Одним из наиболее распространенных способов реконструкции пролетных строений является устройство монолитной железобетонной накладной плиты. В числе прочего преимущество

данного метода усиления определяется совместной работой сборных элементов пролетных строений в поперечном направлении, что позволяет увеличить несущую способность и исключить «клавишный эффект». Наиболее остро данная проблема относится к плитным пролетным строениям автодорожных эстакад, так как в процессе эксплуатации их шпунтовые монтажные соединения довольно часто разрушаются.

Численная оценка эффекта увеличения несущей способности пролетного строения при устройстве накладной плиты будет зависеть от принятых технологических схем ремонта и существующего технического состояния конструкции. Если ремонт на период набора проектной прочности бетона накладной плиты сопровождается разгрузкой существующих сборных элементов, допускается принимать традиционные линейные методы расчета по предельному моменту [2]. В том случае, когда накладная плита включается в работу на вторую часть постоянной и временной нагрузки, расчет должен выполняться в нелинейной постановке с учетом процесса

возведения сооружения и соответствующих прочностных характеристик материалов. При этом на каждом этапе монтажа расчет должен производиться для соответствующей конструктивной схемы пролетного строения, содержащей смонтированные к этой стадии элементы.

В статье предлагается методика расчета, которая учитывает три стадии монтажа сооружения (рис. 1). Первая стадия расчета предполагает нагружение существующих элементов пролетного строения первой частью постоянных нагрузок: собственный вес пролетного строения, элементов омоноличивания, накладной плиты и усилия предварительного натяжения. На второй стадии в работу включается накладная плита, сечение воспринимает добавочные постоянные нагрузки от веса дорожной одежды, тротуарных блоков, защитного слоя, перильного и барьерного ограждения. Третья стадия предполагает сочетание постоянных и временных нагрузок. Оценка несущей способности сооружения в предложенной постановке ведется отдельно для существующих элементов пролетного строения и элементов усиления.

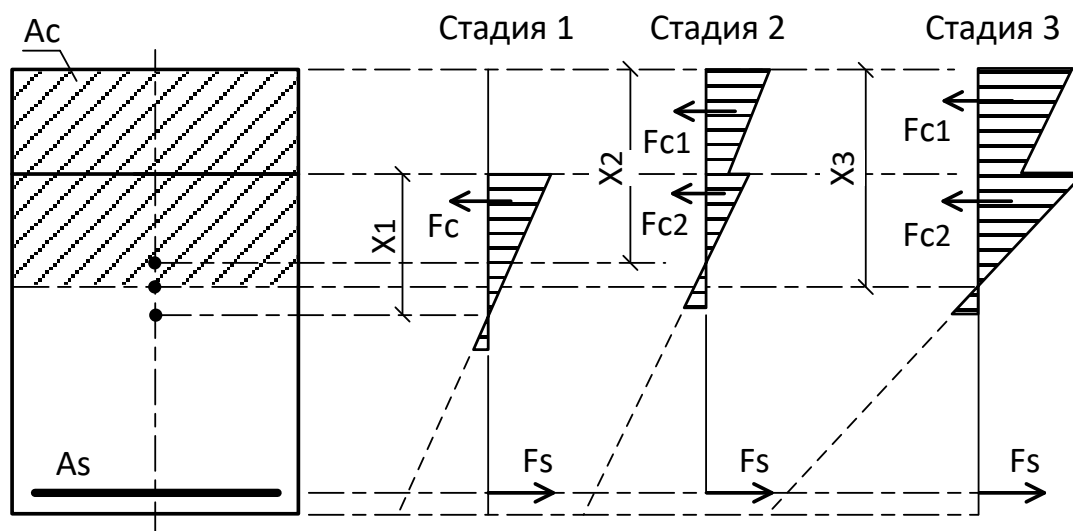


Рис. 1. Стадии работы пролетного строения

Расчет по предложенной методике учитывает:

- работу накладной плиты в составе полного сечения на отдельные виды нагрузок;

- истинные прочностные характеристики бетона для элементов, входящих в поперечное сечение;

- перераспределение усилий между элементами сечения при переходе к очередной стадии нагружения конструкции;

- нелинейные зависимости деформирования бетона и ползучести.

Современное проектирование транспортных сооружений предполагает применение программных комплексов в качестве основного инструмента компьютерного моделирования. Предложенная методика в полной мере реализуется средствами программного комплекса «Лира» [3]. Обширная библиотека конечных элементов, поддержка нелинейных законов работы материалов и мощные инструменты анализа обеспечи-

вают необходимую функциональность при численном анализе конструкций из монолитного железобетона.

Примером предложенного многостадийного моделирования служит расчет эстакады, входящей в состав реконструируемых транспортных сооружений по проспекту 50-летия СССР в г. Харькове.

Пролетное строение эстакады состоит из 31 предварительно напряженной плиты длиной 12 м (расчетная длина балки – 11.4 м) и высотой 60 см с овальными пустотами (рис. 2).

Несущие конструкции сооружения выполнены под нагрузки Н-30 и НК-80 в соответствии с типовым проектом серии 3.503-12 инв. №384/25 «Союздорпроекта». К настоящему времени по результатам обследования предполагаемая потеря прочности бетона составляет 20 %. В соответствии с типовым проектом плиты выполнены из бетона марки 400 (ближайший класс С25/30).

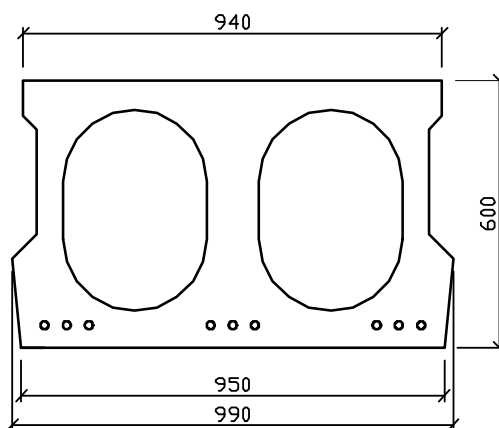


Рис. 2. Сечение существующих плит пролетного строения

В качестве напрягаемой арматуры применена горячекатаная арматурная сталь периодического профиля класса А-IV (9Ø18; привязка – 50 мм). Сила предварительного натяжения арматуры 1173.78 кН. Преднапряжение с учетом всех потерь $\sigma_{spn2}=412.518$ МПа. Высота сжатой

зоны бетона составляет 107 мм. Предельный изгибающий момент сечения в соответствии с типовым проектом $M_u=541.3$ кН×м. Предельный изгибающий момент сечения с учетом потери прочности бетона $M_{uf}=520.66$ кН×м.

Реконструкция пролетного строения предполагает (рис. 3) устройство сплошной железобетонной накладной плиты с минимальной толщиной 150 мм, которая включается в совместную работу с существующими плитами пролетного строения при помощи анкеров ($\varnothing 10$, АШ).

Анкера крепятся в восстановленные монолитные участки швов при помощи самовыравнивающегося цементно-эпоксидного раствора SikaGrout 311. Устройство плиты ведется без предварительной разгрузки пролетных строений.

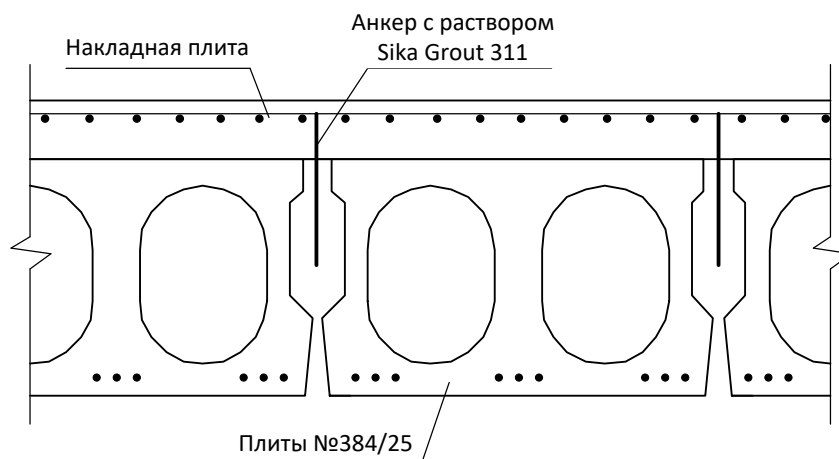


Рис. 3. Схема усиления пролетного строения

Временные нагрузки приняты по схемам Н-30 (СН 200-62), А-11 и НК-80 (ДБН В.2.3-14:2006). Расчеты выполнены для исходного состояния пролетного строения и с учетом реконструкции. Проверка несущей способности плит выполнялась по предельным моментам на каждой стадии нагружения. Расчетная

схема составлена из конечных элементов пластин, моделирующих работу накладной плиты, стержневых КЭ плит, первой группы жестких вставок для передачи усилий предварительного натяжения и второй группы жестких вставок – для «подвешивания» сборных элементов существующего пролетного строения (рис. 4, 5).

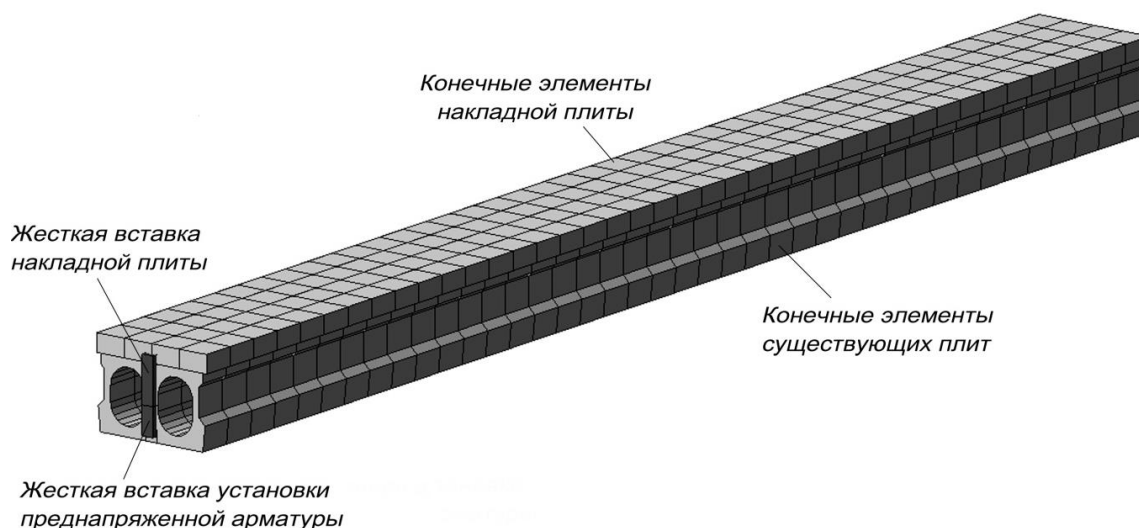


Рис. 4. Типовой фрагмент расчетной схемы пролетного строения

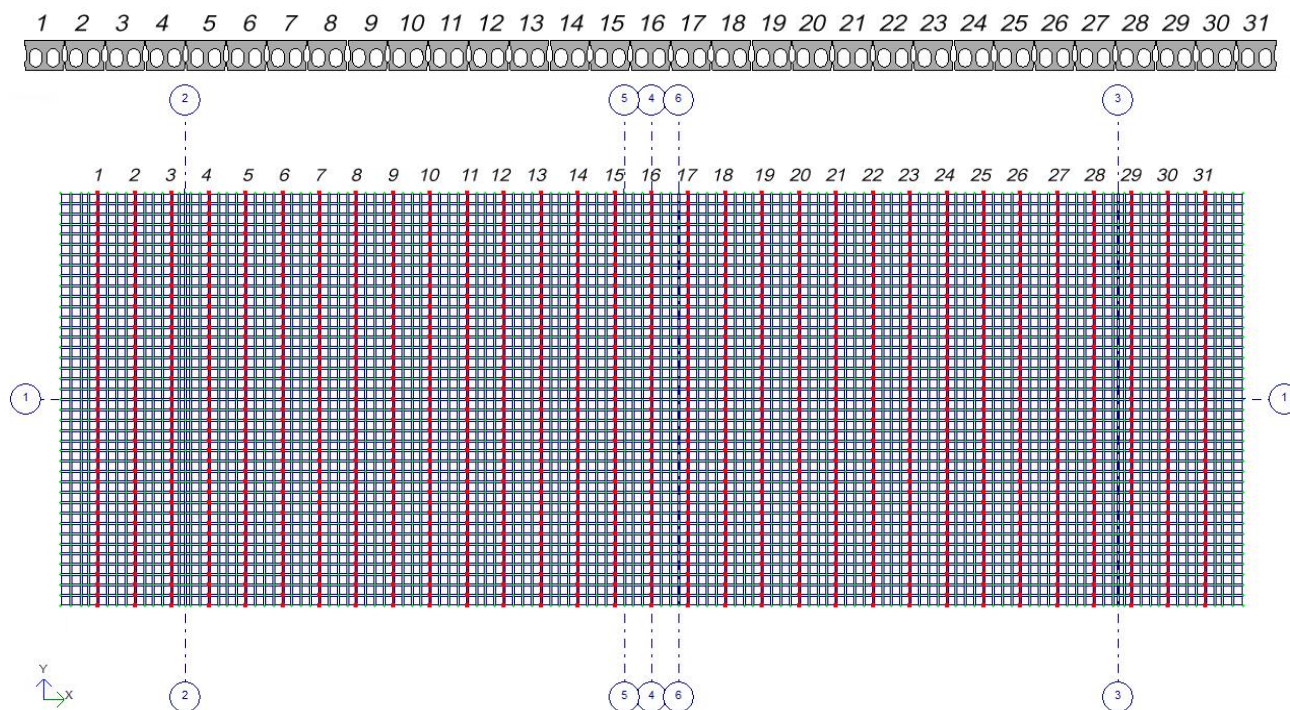


Рис. 5. Расчетная схема пролетного строения в сечении и плане

Результаты расчетов представлены в виде линий усилий, построенных для опасного сечения пролетного строения

(рис. 6, 7). Сводные результаты приведены в таблице.

Таблица

Результаты расчета

Усилие	Единица измерения	Статика	А-11 + статика + толпа	НК-80 + статика	Н-30 + статика + толпа
Максимальный изгибающий момент в плитах для исходного состояния конструкции	кН×м	323.9	602.2	483.3	524.4
Предельный момент в плитах для исходного состояния с учетом потери прочности бетона на 20 %	кН×м	520.66			
Полный изгибающий момент в сечении пролетного строения с учетом реконструкции	кН×м	366.3	643.4	532.3	591.7
Изгибающий момент в плитах пролетного строения с учетом реконструкции	кН×м	351.7	514.8	453.5	493.2
Изгибающий момент в накладной плите	кН×м	14.6	128.6	78.8	98.5

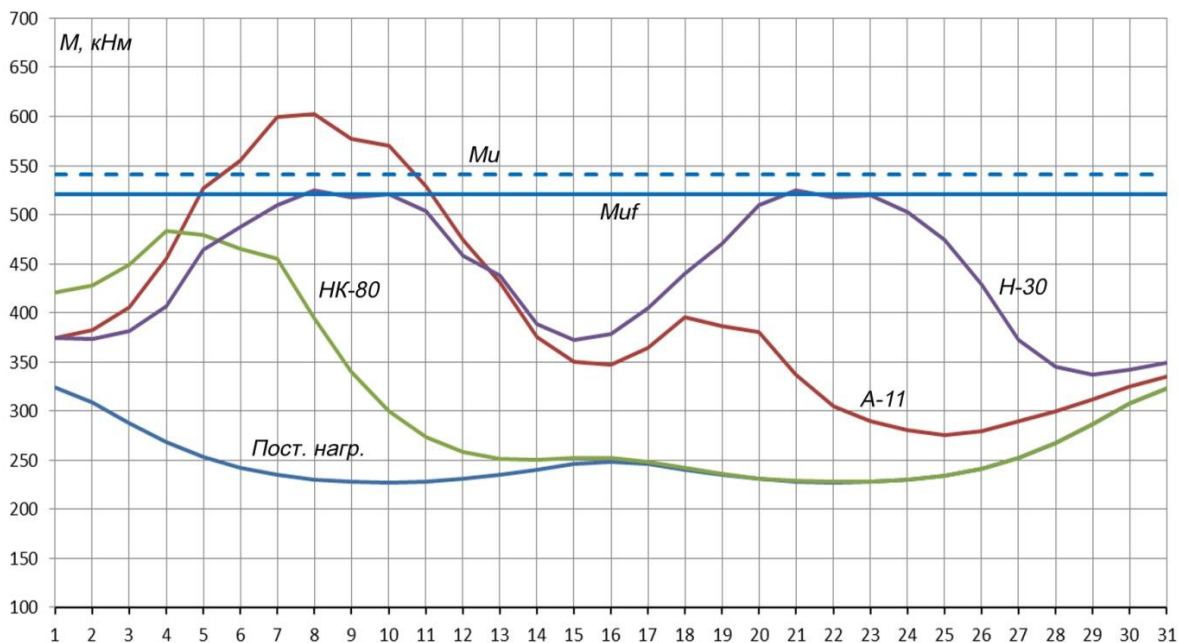


Рис. 6. Линии усилий для пролетного строения в исходном состоянии

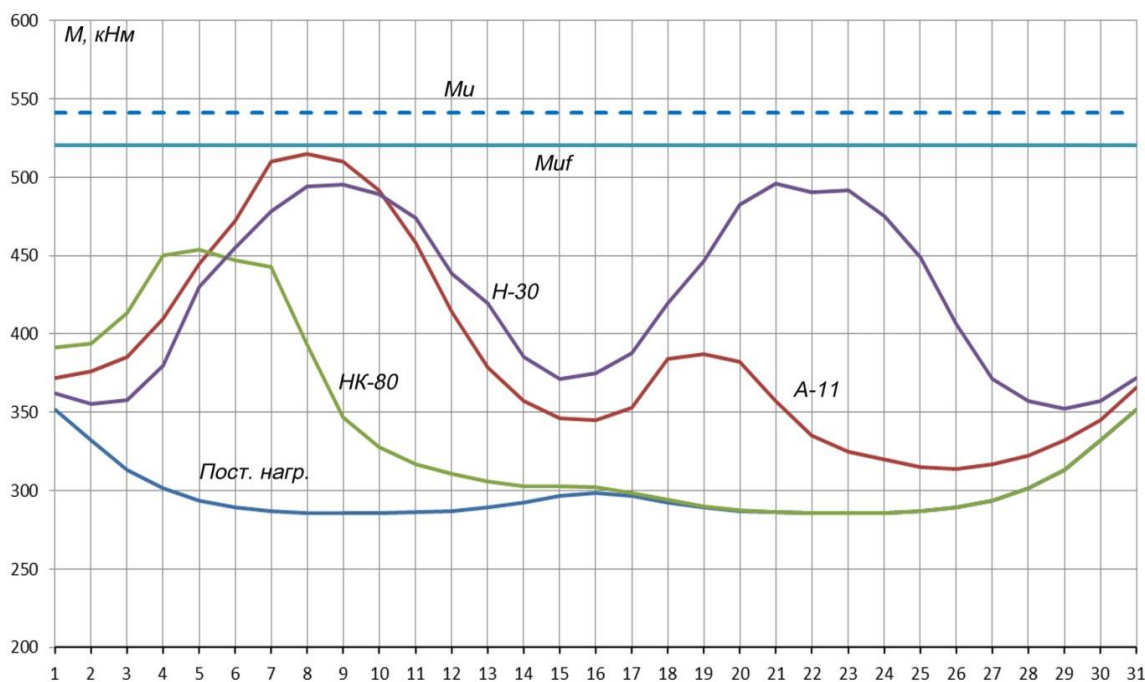


Рис. 7. Линии усилий для пролетного строения после реконструкции

На рис. 8 показано распределение напряжений для верхних волокон плиты при загрузении временной нагрузкой по схеме А-11 (с учетом пешеходов). Полученный закон изменения напряжений по высоте на последней стадии нагружения

определяет долю изгибающего момента, который приходится на накладную плиту. Изгибающий момент, воспринимаемый существующими плитами, определяется разностью полного момента и момента, приходящегося на накладную плиту.

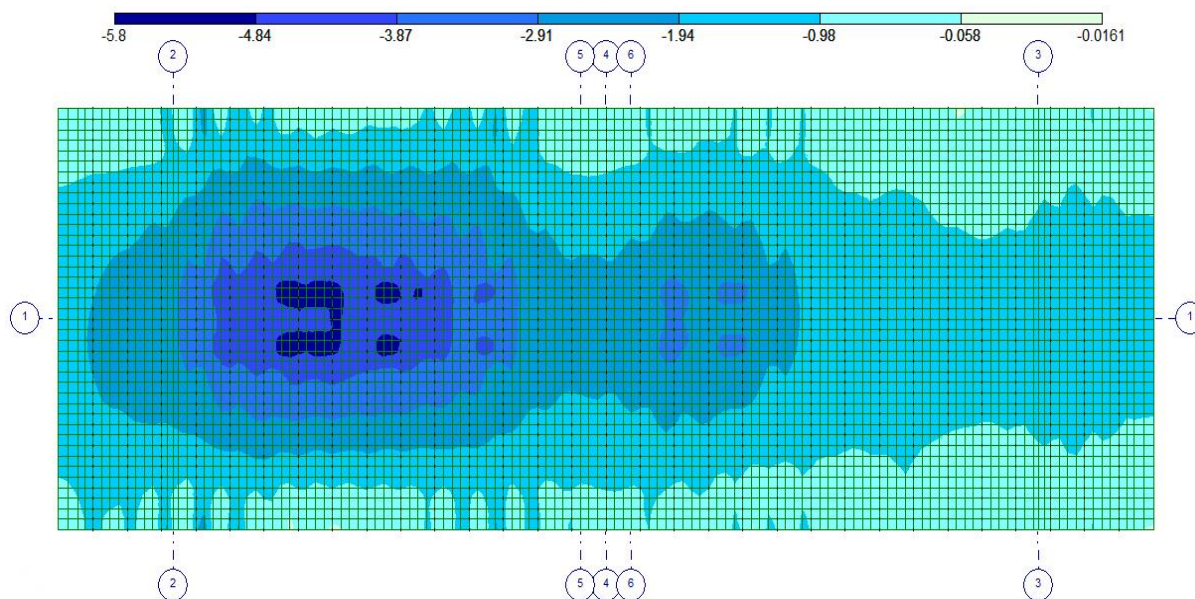


Рис. 8. Напряження в верхніх волокнах накладної плити

Как показывают расчеты, моделирование последовательности монтажа пролетного строения приводит к уменьшению влияния накладной плиты на несущую способность сооружения после реконструкции. Доля полного изгибающего момента, возникающего от всех постоянных нагрузок и воспринимаемого накладной плитой, составляет 4 %, то же от

нагрузки по схеме А-11 (с учетом пешеходов) – 20 %, для нагрузки НК-80 – 15 %, для нагрузки Н-30 – 17 %.

Предложенная методика моделирования позволила установить истинную несущую способность эстакады после реконструкции и назначить оптимальную конструкцию усиления для соответствия современным нагрузкам НК-80 и А-11.

Список литературы

1. Мости: конструкції та надійність [Текст]: довідник / Й.Й. Лучко, П.М. Коваль, М.М. Корнієв [та ін.]; за ред. В.В. Панасюка і Й.Й. Лучка; Нац. академія наук України. Фіз.-мех. ін-т ім. Г.В. Карпенка. – Львів: Каменяр, 2005. – 989 с.
2. ДБН В.2.3-14:2006. Мости та труби. Правила проектування [Текст]. – К.: Міністерство будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства, 2006. – 359 с.
3. Компьютерные модели конструкций [Текст]/ А.С. Городецкий, И.Д. Евзеров. – К.: Издательство «Факт», 2007. – 394 с.

Ключевые слова: накладная плита, эстакада, пролетное строение, моделирование.

Аннотации

У статті розглядається методика комп'ютерного моделювання роботи плитної прогонової будови естакади після реконструкції за схемою облаштування залізобетонної накладної плити. Розрахунок припускає облік послідовності зведення спорудження за трьома стадіями.

В статье рассматривается методика компьютерного моделирования работы плитного пролетного строения эстакады после реконструкции по схеме устройства железобетонной накладной плиты. Расчеты предполагают учет последовательности возведения сооружения по трем стадиям.

In the article the method of computer simulation of the slab span overpass after reconstruction scheme device properties of concrete slabs bill. Calculation takes into consideration the sequence of construction is in three stages.

УДК 625.014.37

Канд. техн. наук Ю.В. Глазунов,

Y. Glazunov

МІЦНІСТЬ БЕТОНУ ПРИ ЗОВНІШНЬОМУ АРМУВАННІ КОНСТРУКЦІЙ

STRONG OF BETON BY INCULCATE OUTWARD ARMATURA

Представив д-р техн. наук, професор А.А. Плугін

Постановка проблеми у загальному вигляді, її зв'язок з важливими науковими та практичними завданнями. З розвитком виробничих сил у галузі будівництва виникає необхідність упровадження все більш ефективних і економічних конструкцій. Бетон у поєднанні зі сталлюю арматурою виявляється основним матеріалом для житлово-громадянського, промислового, енергетичного, транспортного та сільськогосподарського будівництва.

Відомо, що основні напрямки прогресу в сучасних будівельних конструкціях належним чином пов'язані з проблемою економії сталі. Заміна сталевих конструкцій залізобетонними надає можливість економити сталь, але це не завжди пов'язано з економією грошових коштів. Тому поряд з пошуками успішно конкуруючих рішень у залізобетоні стимулюється розвиток інших комплексних матеріалів і конструкцій, зокрема сталевобетонних.

Збірні та монолітні конструкції із зовнішнім армуванням одержали розповсюдження в різних галузях будівництва в нашій країні та за кордоном. Цьому сприяли розширення галузі застосування залізобетону (у тому числі для спеціальних споруд енергетичного та гідротехнічного будівництва), техніко-економічна ефективність таких конструкцій, а також можливість використання зовнішньої арматури як опалубки при монолітному способі будівництва.

Концентроване розташування листової арматури на зовнішніх гранях сталевобетонних конструкцій дозволяє знизити їх масу, зменшити розміри перерізу порівняно з залізобетонними конструкціями та одержати економію сталі при однаковій висоті.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У роботах [1-3] зазначено важливість впровадження конструкцій із зовнішнім армуванням як найбільш

економічних конструкцій порівняно з традиційними залізобетонними. Економічність таких конструкцій забезпечується за рахунок більш раціонального використання матеріалів.

У науковій праці [1] відмічено, що армування бетону зовнішньою оболонкою сприяє підвищенню міцності такого конструктивного елемента, як сталобетон. Досягаються найкращі показники щодо роботи бетону при навантаженні, у результаті чого зменшуються усадочні деформації і підвищується опір бетону дії агресивного середовища.

У роботі [2] надано дослідження фізико-механічних властивостей матеріалів, які знаходяться у складі сталобетонних конструкцій. Показано вплив матеріалів на несучу здатність і деформації сталобетонних елементів. Визначено геометричні характеристики поперечного перерізу конструкції зі сталобетону. Показано теоретичні рішення для оцінки напружено-деформованого стану згинаючих стержнів з урахуванням об'ємного напруженого стану бетонного ядра.

У роботах [3-5] розроблено методику розрахунку сталобетонних елементів прямокутного поперечного перерізу на міцність при осьовому стиску. Показано взаємодію сталюї оболонки і бетонного ядра, яке працює в умовах об'ємного напруженого стану зі змінними параметрами деформування. Наведено чисельні розрахунки напружено-деформованого і граничного стану перерізу сталобетонної конструкції.

Основний матеріал статті. Метою дослідження є проведення експериментально-теоретичних досліджень впливу способів передачі зовнішнього поздовжнього навантаження на несучу здатність сталобетонних колон прямокутного перерізу.

Основне завдання, яке необхідно було вирішити у наведеному дослідженні, таке:

- розроблення способу розрахунку сталобетонних конструкцій на центральне

стиснення при передачі поздовжнього навантаження на кожний конструктивний елемент окремо;

- визначення наявності сил зчеплення між бетоном і сталлю та їх вплив на несучу здатність сталобетонних колон;

- перевірка міцності сталобетонних балочних конструкцій при роботі на згин з визначенням сил зсуву по площині з'єднання листової арматури і бетону по довжині балки;

- одержання експериментальних даних про вплив способів передачі поздовжнього навантаження на характер деформування та зруйнування сталобетонних колон.

У даній роботі розроблено способи розрахунку сталобетонних конструкцій при різних виявах зовнішнього поздовжнього навантаження. Експериментальними дослідженнями виявлено вплив способів прикладення зовнішнього поздовжнього навантаження на несучу здатність сталобетонних конструкцій і надано порівняння з теоретичними результатами.

Експериментальні дослідження сталобетонних зразків проведено на осьове стиснення при передачі поздовжнього навантаження на бетон і сталь одночасно; на сталюну обойму в зразку, заповненому бетоном; на сталюну обойму в зразку без бетонного ядра.

При таких способах передачі навантажень на поздовжніх сторонах пластин обойми згинальні моменти відсутні. Це дозволяє розглядати металеву обойму як окремі шарнірно оперті пластини, завантажені в поздовжньому і в поперечному напрямках. При цьому припускається, що односторонні контактні зв'язки між заповнювачем і обоймою не перешкоджають згину пластин назовні.

Для експериментальних досліджень було виготовлено 4 серії зразків, висота яких – 500 мм. Відношення розмірів поперечних перерізів v/a складають 1,0; 1,3; 1,6; 2,0. Товщина оболонки 2; 3,1; 3,8; 4,1 мм. Оболонки виготовлялись з двох

стальних листів, зігнутих у вигляді швелерів і зварених по всій довжині.

Для вищезазначених матеріалів були проведені стандартні випробування. Міцність і деформації бетону на стиснення визначались за результатами випробувань кубів $100 \times 100 \times 100$ мм і призм. Характеристики деформацій і міцності при розтягуванні бетону визначались на зразках $40 \times 40 \times 80$ мм. Деформації в бетонних призмах фіксувались поздовжніми і поперечними тензодатчиками в середньому перерізі по довжині кожної призми.

Характеристики міцності та деформацій сталі отримано в результаті випробувань на розтягування штаби з такими розмірами: $500 \times 40 \times 2$; $500 \times 20 \times 2$; $500 \times 40 \times 4$ мм, які були вирізані з оболонок сталобетонних колон. Деформації при цьому визначались тензодатчиками та оптичними тензометрами.

Сталобетонні колони випробувались на гідравлічному пресі ПММ-250. Опорні пристосування забезпечували шарнірну схему закріплення зразка. Спеціальні захоплювачі дозволяли випробовувати колони з різним поперечним перерізом. У процесі випробувань вимірювались поздовжні і поперечні деформації. Для цього в зразках по всьому периметру середнього по довжині перерізу наклеювались тензодатчики в поперечному та поздовжньому напрямках.

Центрування колон у процесі випробування виконували згідно з показниками тензодатчиків. Колони завантажувалися етапами з витримками для зняття показників вимірювальних приладів. Відрахування по приладах починали знімати з початку навантаження.

Розглянемо приклад передачі сили одночасно на сталь і бетон (рис. 1).

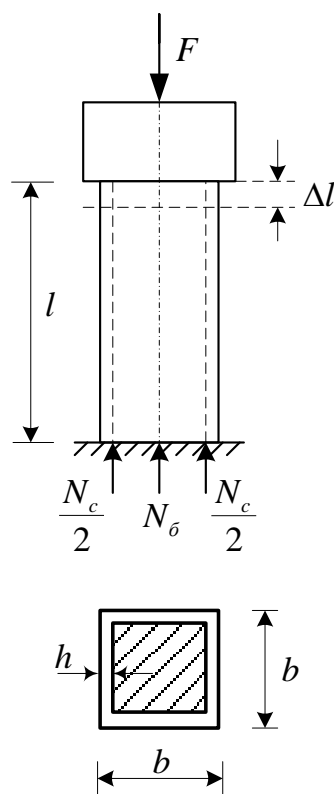


Рис. 1. Приклад передачі сили одночасно на сталь і бетон

Запишемо умови рівноваги:

$$N_c + N_{\bar{\sigma}} = F \quad (1)$$

Умова сумісності деформацій:

$$\Delta l_c = \Delta l_{\bar{\sigma}};$$

$$\frac{N_c l}{E_c A_c} = \frac{N_{\bar{\sigma}} l}{E_{\bar{\sigma}} A_{\bar{\sigma}}} \quad (2)$$

Площа перерізу оболонки:

$$A_c = 2bh + 2(b - 2h)h = 4h(b - 2h) \quad (3)$$

Площа перерізу бетону:

$$A_{\bar{\sigma}} = (b - 2h)^2 \quad (4)$$

Враховуючи вирази (3) і (4) з умови (2) маємо таке значення:

$$N_{\bar{\sigma}} = N_c \frac{E_{\bar{\sigma}}(b - 2h)}{4hE_c} \quad (5)$$

Зміна розмірів при поперечній деформації:

$$\varepsilon_{\bar{\sigma}}' = \nu_{\bar{\sigma}} \varepsilon_{\bar{\sigma}}, \varepsilon_c' = \nu_c \varepsilon_c$$

Враховуючи, що $\varepsilon_{\bar{\sigma}} = \varepsilon_c$, а $\nu_{\bar{\sigma}} < \nu_c$, то $\varepsilon_{\bar{\sigma}}' < \varepsilon_c'$.

Розмір поперечного перерізу бетону після деформації (рис. 2) визначається так:

$$b_{\bar{\sigma}}' = b_{\bar{\sigma}} \cdot \varepsilon_{\bar{\sigma}}' = b_{\bar{\sigma}} \nu_{\bar{\sigma}} \varepsilon_{\bar{\sigma}} = b_{\bar{\sigma}} \nu_{\bar{\sigma}} \frac{N_{\bar{\sigma}}}{E_{\bar{\sigma}} A_{\bar{\sigma}}} = \frac{\nu_{\bar{\sigma}} N_{\bar{\sigma}}}{E_{\bar{\sigma}}} \cdot \frac{b_{\bar{\sigma}}}{A_{\bar{\sigma}}} = \frac{\nu_{\bar{\sigma}} N_{\bar{\sigma}}}{E_{\bar{\sigma}}} \cdot \frac{1}{b - 2h} \quad (6)$$

Внутрішній розмір поперечного перерізу оболонки:

$$b_c' = b_{\bar{\sigma}} \cdot \varepsilon_c' = b_{\bar{\sigma}} \nu_c \varepsilon_c = b_{\bar{\sigma}} \nu_c \frac{N_c}{E_c A_c} = \frac{\nu_c N_c}{E_c} \cdot \frac{1}{4h} \quad (7)$$

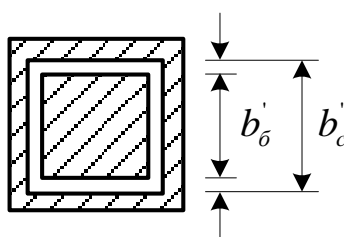


Рис. 2. Поперечний переріз бетону після деформації

Зчеплення бетону зі сталлюю оболонкою:

$$\frac{b_c' - b_{\bar{\sigma}}'}{2} = \frac{\frac{\nu_c N_c}{E_c} \cdot \frac{1}{4h} - \frac{\nu_{\bar{\sigma}} N_{\bar{\sigma}}}{E_{\bar{\sigma}}} \cdot \frac{1}{b - 2h}}{2} = \frac{\nu_c N_c}{E_c} \cdot \frac{1}{8h} - \frac{\nu_{\bar{\sigma}} N_{\bar{\sigma}}}{E_{\bar{\sigma}}} \cdot \frac{1}{2(b - 2h)} \quad (8)$$

Пластини, які входять до обойми, можуть утратити стійкість. За відсутності бетонного ядра, коли стискальні напруження могли б дорівнювати своєму критичному значенню, починалось би випинання і поперечні перерізи обойми могли б скривитися. Тоді поздовж кутів між стінками обойми, що випинає, не буде згинальних моментів, і кожна стінка

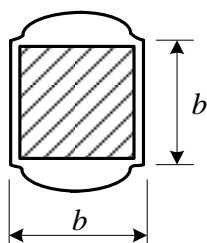


Рис. 3. Деформація при випинанні пластинки

знаходиться в умовах стисненої прямокутної пластинки з вільно опертими краями [1]. За наявності ж бетонного ядра деформація при випинанні буде іншою (рис. 3), у зв'язку з чим стінку обойми необхідно розглядати як стиснену пластинку з поздовжніми защемленими краями (рис. 4).

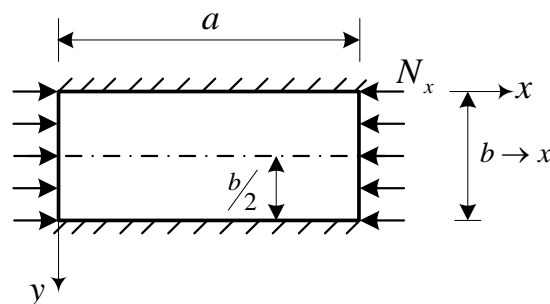


Рис. 4. Стиснена пластинка з поздовжніми защемленими краями

Диференціальне рівняння зігнутої поверхні пластинки при цьому буде мати такий вигляд:

$$\frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \omega}{\partial y^4} = - \frac{N_x}{D} \cdot \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \quad (9)$$

Далі розглянемо розв'язання у такому вигляді:

$$\omega = f(y) \sin \frac{m \pi x}{a}, \quad (10)$$

що задовольняє граничні умови

$$\omega = 0 \text{ и } M_x = \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + M \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) = 0$$

при $x = 0$ і $x = a$.

Якщо підставити вираз (10) у вираз (9) і скоротити на $\sin(m \pi x / a)$, одержимо

$$\frac{\partial^4 f}{\partial y^4} - 2\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + \left[\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 - \frac{\sigma_x h}{D}\right] \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 f = 0 \quad (11)$$

Від рівняння (9) в окремих похідних переходимо до звичайного диференціального рівняння. Інтегрування рівняння (11) в даному випадку не дуже важке, у більш складних задачах воно може бути виконано за допомогою різних наближених методів, наприклад метода Бубнова-Галеркіна.

Повертаємось до рівняння (11) та уведемо таке позначення:

$$\frac{m\pi}{a} = \lambda \quad (12)$$

Вважаючи, що

$$\alpha = \sqrt{\lambda\left(\lambda + \sqrt{\frac{\sigma_x h}{D}}\right)}, \quad \beta = \sqrt{\lambda\left(\sqrt{\frac{\sigma_x h}{D}} - \lambda\right)}, \quad (13)$$

одержимо інтеграл рівняння (11) у такому вигляді:

$$f(y) = C_1 ch \alpha y + C_2 sh \alpha y + C_3 \cos \beta y + C_4 \sin \beta y \quad (14)$$

Система має розв'язок за умови рівності нулю визначника системи:

$$(ch \alpha b - \cos \beta b)^2 - \left(sh \alpha b + \frac{\beta}{\alpha} \sin \beta b\right) \left(sh \alpha b - \frac{\alpha}{\beta} \sin \beta b\right) = 0 \quad (15)$$

З рівняння (13) маємо

$$\alpha^2 + \beta^2 = 2\lambda \sqrt{\frac{\sigma_x h}{D}}, \quad \alpha^2 - \beta^2 = 2\lambda^2 \quad (16)$$

Використовуючи рівняння (15) і (16), визначаємо критичне напруження [4]. Введемо такі позначення:

$$\xi = \frac{ab}{2}; \quad \eta = \frac{\beta b}{2} \quad (17)$$

Рівняння (16) набуває такого вигляду:

$$\sigma_x = \frac{D}{h} \frac{4}{\pi^2 b^2} \left(\frac{a}{mb}\right)^2 (\xi^2 + \eta^2)^2; \quad (18)$$

$$\xi^2 - \eta^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{mb\pi}{a} \right)^2 \rightarrow \xi = \sqrt{\eta^2 + \frac{\pi^2}{2} \left(\frac{mb}{a} \right)^2} \quad (19)$$

Визначаємо величини ξ і η з рівняння (19) і за формулою (18) знаходимо критичне значення σ_x .

Подамо критичне напруження як

$$\sigma_{кр} = K \frac{\pi^2 D}{b^2 h}, \quad (20)$$

де

$$K = \frac{4}{\pi^2} \left(\frac{a}{mb} \right)^2 (\xi^2 + \eta^2)^2. \quad (21)$$

Знаходимо значення $\frac{a}{mb}$, при якому $K \rightarrow \min$.

Маємо

$$\frac{a}{mb} = 0.663, \eta = 2.05186, \xi = 3.92894 \text{ і } K_{\min} = 6.968.$$

Тоді, наприклад, при $b = 40$ см, $h = 0.5$ см, $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, $\nu = 0.3$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 10^6 \cdot 0.5^3 \cdot 10^{-6}}{12(1-0.3^2)} = 2289 \text{ м},$$

$$\sigma_{кр} = 6.968 \frac{\pi^2 \cdot 2289}{40^2 \cdot 10^{-4} \cdot 0.5 \cdot 10^{-2}} \cdot 10^{-6} = 196.8 \text{ МПа}.$$

Критична сила

$$F_{кр} = \sigma_{кр} A_c = 196.8 \cdot 10^6 \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot 0.5 (40 - 2 \cdot 0.5) \cdot 10^{-4} = 1535 \text{ кН}.$$

Якщо $N_c = F_{кр}$, то за виразом (5) для класу бетону міцністю В25:

$$N_{\sigma} = 1535 \frac{30 \cdot 10^3 (40 - 2 \cdot 0.5)}{2 \cdot 10^5 \cdot 4 \cdot 0.5} = 4490 \text{ кН}.$$

Визначаємо напруження в бетоні:

$$\sigma_{\sigma} = \frac{N_{\sigma}}{A_{\sigma}} = \frac{4490 \cdot 10^3}{(40 - 2 \cdot 0.5)^2 \cdot 10^{-4}} \cdot 10^{-6} = 29.52 \text{ мПа} > 25.$$

При $N_{\sigma}^{пред} = 25 \cdot 10^6 \cdot 10^{-3} \cdot 39^2 \cdot 10^{-4} = 38025 \text{ кН}$

$$N_c = \frac{38025 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 4 \cdot 0.5}{30 \cdot 10^3 \cdot 39} = 1300 \text{ кН}.$$

Граничне навантаження:

$$F_{np} = N_c + N_{\sigma} = 1300 + 38025 = 51025 \text{ кН}.$$

При даному навантаженні бетон не бере участі в його прийнятті, і воно все передається на оболонку. А оскільки $F_{np} > F_{кр}$ ($5102.5 > 1535.0$), оболонка втрачає стійкість.

«Відшаровування» бетону, враховуючи вираз (8), при граничному навантаженні $F_{np} = 5102.5 \text{ кН}$:

$$\frac{b'_c - b'_{\sigma}}{2} = \frac{0.3 \cdot 1300 \cdot 10^3 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^5 \cdot 10^6 \cdot 8 \cdot 0.5 \cdot 10^{-2}} - \frac{0.18 \cdot 38025 \cdot 10^3 \cdot 10^3}{30 \cdot 10^3 \cdot 10^6 \cdot 2(40 - 2 \cdot 0.5) \cdot 10^{-2}} =$$

$$\frac{3.9}{80} - \frac{0.18 \cdot 38025}{600 \cdot 39} = 0.04875 - 0.02925 = 0.0195 \text{ мм};$$

$$\varepsilon_{\sigma} = \frac{N_{\sigma}}{E_{\sigma} A_{\sigma}} = \frac{38025 \cdot 10^3}{30 \cdot 10^3 \cdot 10^6 \cdot 39^2 \cdot 10^{-4}} = 0.083 \dots \cdot 10^{-2};$$

$$\varepsilon_{\sigma} = \frac{N_c}{E_c A_c} = \frac{1300 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^5 \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot 0.5 \cdot 39 \cdot 10^{-4}} = 0.083 \dots \cdot 10^{-2}.$$

Для випробуваного зразка (рис. 5):

$$A_{\sigma} = (13 - 2 \cdot 0.2)^2 = 158.76 \text{ см}^2,$$

$$A_c = 4 \cdot 0.2(13 - 2 \cdot 0.2) = 10.08 \text{ см}^2.$$

При $\frac{a}{mb} = 0.663$, $m = \frac{a}{0.663b} = \frac{50}{0.663 \cdot 13} = 5.8$ півхвилі.

$$D = \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)} = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 10^6 \cdot 0.2^3 \cdot 10^{-6}}{12(1 - 0.3^2)} = \frac{800}{5.46} = 146.5 \text{ Нм}.$$

$$\sigma_{кр} = 6.968 \frac{\pi^2 \cdot 146.5}{13^2 \cdot 10^{-4} \cdot 0.2 \cdot 10^{-2}} \cdot 10^{-6} = 298 \text{ мПа.}$$

$$F_{кр} = \sigma_{кр} A_c = 298.08 \cdot 10.08 \cdot 10^{-4} \cdot 10^6 \cdot 10^{-3} = 300.05 \text{ кН.}$$

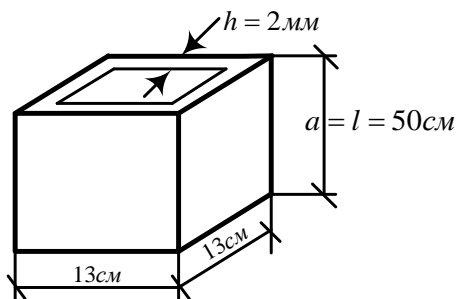


Рис. 5. Схема випробуваного зразка

При $N_c = F_{кр}$

$$N_{\sigma} = 300.46 \frac{30 \cdot 10^3 (13 - 2 \cdot 0.2)}{2 \cdot 10^5 \cdot 4 \cdot 0.2} = 710 \text{ кН;}$$

$$\sigma_{\sigma} = \frac{710 \cdot 10^3}{(13 - 2 \cdot 0.2)^2 \cdot 10^{-4}} \cdot 10^{-6} = 44.7 \text{ мПа} > 36 \text{ мПа.}$$

Навантаження на зразок визначається так:

$$F_{np} = N_{\sigma}^{кр} + N_c = 572 + 242 = 814 \text{ кН.}$$

Навантаження, при якому зразок зруйнувався:

$$F_{on} = 880 \text{ кН.}$$

$$\Delta F = \frac{880 - 814}{814} \cdot 100 = 8 \%.$$

Перевищення дослідного навантаження від розрахункового на 8% пояснюється збільшенням границі міцності бетону при твердінні (тужавленні) в обоймі без доступу повітря.

Слід зазначити, що при більшій товщині сталевих стінок колони руйнування оболонки буде відбуватися без втрати стійкості стінки. Порядок визначення навантаження, при якому буде

руйнування, у цьому випадку повинен виконуватись за іншою схемою [5].

На ділянці від початку навантаження і до ступеня досягнення значення максимальної сили зчеплення $F_{зч}$ зв'язок між дотичними напруженнями і деформаціями граничного шару прямолінійний. Процес видавлювання бетонної призми супроводжується, як правило, підвищенням навантаження над граничним, яке характеризує збільшення сил зчеплення в 1,2-3 рази.

Зростання навантаження при видавлюванні може бути пояснено недосконалістю внутрішньої поверхні оболонки (непрямолінійністю стінок, різними поперечними розмірами оболонки по довжині і т. ін.) і силами тертя, які відбуваються в результаті стиснення металевої оболонки бетоном. Цьому стисненню сприяє ущільнення бетону вібуванням. Недосконалості, які виникають при виготовленні, потребують додаткових зусиль для продавлювання бетонної призми.

Експериментальними дослідженнями підтверджено висновки теоретичної частини стосовно підвищення міцності сталобетонних конструкцій порівняно із залізобетонними. У сталобетонних конструкціях наявність обойми, опірній переміщенню бетону в поперечному напрямку, призводить до збільшення міцності бетону, а наявність заповнювача усередині оболонки збільшує її стійкість. Бетон і сталь у такому поєднанні створюють найбільш сприятливі умови для одночасного сприймання навантаження.

Висновки і перспективи подальшого використання. На основі проведеного аналізу теоретичних та експериментальних досліджень зроблено

висновок, що застосування сталобетону є ефективним у конструкціях, працюючих на осьове стиснення, а також в елементах, які підлягають згину і позацентровому стисненню. При цьому, порівняно із залізобетонними, сталобетонні конструкції мають підвищену несучу здатність, жорсткість, тріщиностійкість, а порівняно з металевими – меншу металомісткість.

Результати випробувань сталених оболонок у зразках без бетонного ядра показали, що розрахунки критичних напружень і границі несучої здатності надають збиткову, порівняно з експериментальними результатами, відносну помилку, яка не перевищує 15 %. Те, що одержані експериментальним шляхом значення критичних напружень менше від теоретичних, можна пояснити наявністю початкових недосконалостей у реальних стержнях.

Несуча здатність оболонок із заповнювачем перевищує несучу здатність порожніх оболонок у середньому в 1,7 разу. Цей результат підтверджує, що заповнювач, який перешкоджає місцевій втраті стійкості, перетворює роботу оболонки на схему чотирьох шарнірно-опертих пластин [3]. Бетонне ядро і оболонка зв'язані між собою силами зчеплення дискретно по довжині і перерізу.

Порівняння теоретичних і експериментальних даних показало, що максимальна розбіжність не перевищує 9,2 %.

Використання в будівництві сталобетонних колон прямокутного перерізу, в основу конструкції яких покладено розроблені способи розрахунків, дозволяє при більших навантаженнях та обмежених розмірах поперечних перерізів знизити витрату сталі на 28-35 % порівняно із залізобетонними колонами.

Список літератури

1. Грушко, И.М. Повышение прочности и выносливости бетона [Текст] / И.М. Грушко, А.Г. Ильин, Э.Д. Чихладзе – Харьков: Изд-во при Харьковском гос. университете, 1986. – 150 с.

2. Стороженко, Л.І. Сталезалізобетонні конструкції [Текст] / Л.І. Стороженко, О.В. Семко. – Полтава, 2001. – 55 с.

3. Чихладзе, Э.Д. Расчет сталебетонных элементов прямоугольного сечения на прочность при осевом сжатии [Текст] / Э.Д. Чихладзе, А.Д. Арсланханов // Бетон и железобетон. – 1993. – № 1. – С. 13-15.

4. Лопатто, А.Э. О свойствах бетона, твердеющего в замкнутой обойме, и жесткости трубобетонных элементов [Текст] // А.Э. Лопатто. – Строительные конструкции. – К., 1973. – 232 с.

5. Глазунов, Ю.В. Вплив способів передачі поздовжнього навантаження на несучу здатність сталебетонних коротких колон прямокутного перерізу [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01/ Ю.В. Глазунов. – Харків, 1997. – 22 с.

Ключові слова: сталебетон, зовнішнє армування, тензодатчики, бетонне ядро, стальна оболонка, сталебетонний елемент.

Анотації

Повідомлено щодо проведених теоретичних та експериментальних досліджень сталебетонних конструктивних елементів при різних способах поздовжнього навантаження і показано техніко-економічну ефективність застосування таких конструкцій замість сталевих і залізобетонних.

Приведены теоретические и экспериментальные исследования сталебетонных конструктивных элементов при разных способах приложения продольной нагрузки и показана технико-экономическая эффективность применения таких конструкций в сравнении со стальными и железобетонными конструктивными элементами.

A method of strength calculation of rectangular section of steel-concrete columns depending on the process of longitudinal loading has been developed. Theoretical and experimental data have been compared. Cite experiment and theoretical investigation steel concrete constructions depending on the process of longitudinal loading has been developed and method their calculation. There was executed the experimental and theoretical researches of the steel-concrete elements, working by center compression.

УДК [624.073+624.016]

*Канд. техн. наук С.Ю. Берестянська,
А.О. Берестянська*

*S. Ju. Berestyanskaya,
A.A. Berestyanskaya*

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ РОБОТИ СТАЛЕБЕТОНИХ ПЛИТ ПРИ СИЛОВИХ ВПЛИВАХ

INVESTIGATION ANALYSIS OF STEEL CONCRETE SLABS BEHAVIOR UNDER THE LOADING

Представив д-р техн. наук, професор А.А. Плугін

Вступ. Сталебетонні конструкції є ефективними порівняно із залізобетонними. Ефективність листового армування найбільш відчутна при монолітному будівництві. Найбільш трудомістким і складним процесом при будівництві монолітним способом є опалубні роботи. Заміна дерев'яної опалубки сталевим листом з наступним використанням його як розтягнутої арматури дозволяє значно вдосконалити організацію праці й скоротити строки будівництва.

Аналіз останніх досліджень. Аналіз останніх досліджень показав, що на сьогодні існує достатня кількість прикладів використання конструкції із зовнішнім листовим армуванням у світовій і вітчизняній практиці будівництва, що підтверджує їх ефективність і конкурентоспроможність порівняно із залізобетонними.

Виклад основного матеріалу. Розглядаються тонкі пластинки, прогини яких малі порівняно з їх товщинами. Гіпотеза прямих нормалей приймається зі

зсувами, що відповідає відносній деформації зсуву по контакту сталевих листом з бетоном. За початок відліку деформацій приймається стан плити до додавання навантаження. Приймається, що бетон з тріщинами працює як умовно ізотропний матеріал.

Вважаємо, що тріщини утворюються по площадках головних напружень, що розтягують, проходять через центр елемента і в межах елемента симетричні відносно його центра. Критерієм утворення тріщин є досягнення у волокнах бетону граничних деформацій. Знаючи закон зміни нормальних напружень по висоті перерізу, можна обчислити величину погонного згинального моменту інтегруванням у межах висоти перерізу.

Використовуючи відомі вирази для перетворення тензора кривизни і тензора моменту, згинальні моменти в головних напрямках M_1 і M_2 записуються в системі координат (x, y, z) [1-4].

$$\begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{pmatrix}; \quad (1)$$

$$D_{11} = D_1 \sin^2 \alpha + D_2 \cos^2 \alpha ; D_{12} = D_{21} = D_\mu ;$$

$$D_{13} = D_{31} = D_{23} = D_{32} = (D_1 - D_2) \cos \alpha \cdot \sin \alpha / 2 ;$$

$$D_{22} = D_1 \cos^2 \alpha + D_2 \sin^2 \alpha ; D_{33} = (D_1 + D_2 - 2D_\mu) / 4 ;$$

$$D_i = \bar{x}_i^3 E_b / (3(1 - \nu_b^2)) + \bar{x}_{ti}^3 E_{bt} / (3(1 - \nu_{bt}^2)) + E_s A_s (h_0 - x_i)^2 \lambda_i / (1 - \nu_s^2) ;$$

$$D_\mu = 0,5(D_{\mu 1} + D_{\mu 2}) ;$$

$$D_{\mu i} = \nu_b \bar{x}_i^2 \bar{x}_j E_b / (3(1 - \nu_b^2)) + \nu_{bt} \bar{x}_{ti}^2 \bar{x}_{tj} E_{bt} / (3(1 - \nu_{bt}^2)) + \nu_s E_s A_s (h_0 - x_i)(h_0 - x_j) \lambda_j / (1 - \nu_s^2) ; i = 1, 2; j = 2, 1 ;$$

$$K_x = -\partial^2 w / \partial x^2 ; K_y = \partial^2 w / \partial y^2 ; K_{xy} = \partial^2 w / \partial x \partial y , \quad (2)$$

де A_s – площа сталевго листа на одиницю довжини;

$E_b, E_{bt}, \nu_b, \nu_{bt}$ – параметри деформування стиснутого і розтягнутого бетону;

E_s, ν_s – параметри деформування сталевго листа;

λ_i – коефіцієнт піддатливості контакта листової арматури з бетоном;

x_i, x_{ti} – висота розтягнутої і стиснутої зон.

Порівняння дослідних даних з теоретичними. Для оцінки збіжності даних розрахунку напружено-деформованого стану сталобетонних плит було виконано порівняння з експериментальними дослідженнями, виконаними в Харківському автомобільно-дорожньому інституті [2] і проведеними в Національному Університеті Сінгапуру [5].

Для досліджень, проведених у лабораторії кафедри будівельної механіки Харківського автомобільно-дорожнього інституту ім. Комсомолу України, дослідні зразки плит були виготовлені в

умовах Харківського заводу залізобетонних конструкцій тресту «Харьковагропромстрой». Як арматура використовувався сталевий лист товщиною 1,0 мм, з'єднаний з бетоном для спільної роботи нахиленими петлевими анкерами. Для виготовлення анкерів використовувалася гладка дротова арматура d=5 мм класу Вр-1, відстань між гілками витримувалась 0,05 м, з'єднання гілок відбувалося по дузі радіусом 0,025 м. Анкери приварювались до листової арматури ручним електродуговим зварюванням відповідно до вимог п. 3.46 СНІП-2.03.01-84. Отриманий у такий спосіб арматурний каркас укладався в опалубку, і здійснювалося бетонування.

Випробовувалися шарнірно обперті плити з розмірами в плані 1,0x1,0 м, що лежать на опорному контурі, дія зосередженого навантаження прикладеного в центрі плити передавалось через твердий штамп 0,18x0,18 м (рис. 1). Запобігання відриву плити від контуру в кутових зонах здійснювалось пристосуванням, що допускало вільних кутових переміщень і не допускало лінійних.

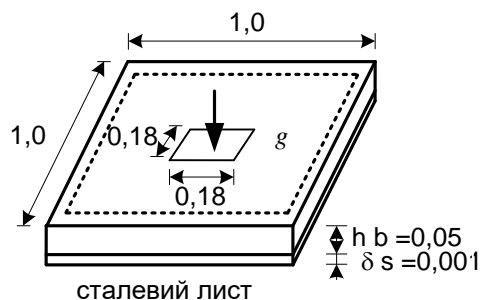


Рис. 1. Схема сталобетонної плити

Випробування здійснювалось навантаженням зразків приблизно 0,1 руйнівного навантаження зі швидкістю 0,30 Н/с. За нульовий відлік приймалися показання приладів, що реєструють, при навантаженні на плиту 5,0 кН.

Деформативно-міцнісні характеристики матеріалів визначалися безпосередньо перед початком випробувань плит на контрольних зразках бетону і сталі. Середня величина знайдених значень модуля пружності бетону $E_{bo} = 37000$ МПа. Міцність бетону при одноосьовому стиску знайдена випробуванням призм і кубів до руйнування у машині УИМ-50, дорівнювала $R_b = 42,5$ МПа. Модуль

пружності листової арматури визначався випробуванням зразка стандартних розмірів і дорівнював $E_s = 206000$ МПа.

На рис. 2. подано порівняння прогинів плит П-4 і П-6 з розрахунковими значеннями, отриманими при розрахунку плити з розмірами, міцнісними характеристиками і схемою обпирання такими самими, як для розглянутих плит (розміром у плані 1,0x1,0 м, висотою 0,05 м, модулем пружності бетону $E_b = 37000$ МПа, товщиною сталевих листа 1,0 мм і $E_s = 206000$ МПа). При моделюванні процесу деформування плит використовувалася сітка 5x5, навантаження здійснювалось кроками величиною 10,0 кН.

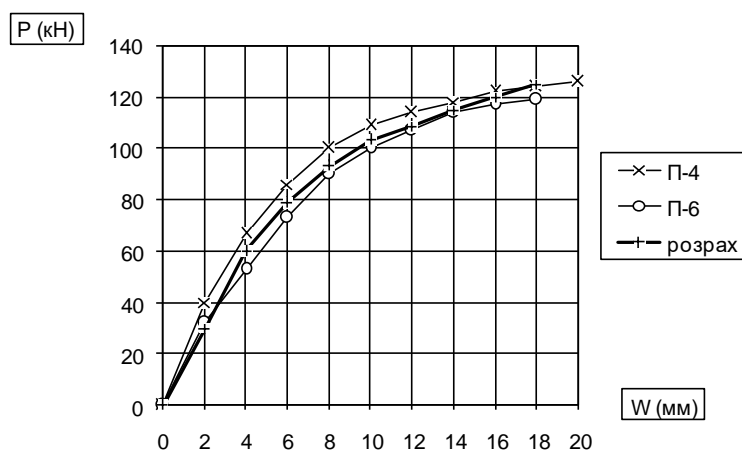


Рис. 2. Залежність прогинів від навантаження, отриманих для центральної точки плити

Як видно з рис. 2, розрахункове значення прогинів відповідає експериментальним значенням. Так, при

навантаженні на плиту 80 кН відсоток розбіжності по прогинах $\approx 6\%$, а при руйнівному навантаженні – 9% .

Порівняння експериментальних і теоретичних значень руйнівних навантажень для описаних плит (табл. 1) показує гарну збіжність розрахункових значень із експериментальними. Відсоток розбіжності становить до 5 %.

З табл. 2, у якій наведено результати розрахунку плити з наведеними раніше характеристиками, видно, що поява тріщин у розтягнутій зоні бетону не призводить до стрибка прогинів. Це відповідає даним роботи [1] і пояснюється перерозподілом зусиль. При числовому розрахунку перші

тріщини з'явилися при навантаженні 30 кН, а в експериментальних дослідженнях – при навантаженні 40 кН. Перед руйнуванням напруження у стиснутій зоні бетону близькі до граничних. Це говорить про вичерпані міцнісних властивостей бетону. Напруження в сталевому листі ще не досягли межі текучості. У цьому разі руйнування відбувається через утворення тріщин у стиснутій зоні бетону, тобто крихке руйнування, що співпадає з даними роботи [1].

Таблиця 1

Порівняння експериментальних і теоретичних значень несучої здатності сталобетонних плит

№ плит	Межа текучості листових арматур, МПа	Міцність бетону, МПа	Експериментальне руйнівне навантаження, кН	Розрахункове руйнівне навантаження, кН	Відсоток розбіжності %
П-4	230,0	42,5	130,0	125,0	3,8
П-6	230,0	42,5	120,0	125,0	4,2

Таблиця 2

Характеристики напружено-деформованого стану сталобетонної плити

Навантаження кН/м ²	Прогини мм	Напруження в бетоні, МПа		Напруження в сталевому листі, МПа
		сжатом	растянутом	
10	5	0,6	0,65	4,63
20	13	16,61	1,13	9,16
30	21	26,35	2,11	14,31
40	28	33,64	2,71	18,84
50	36	42,84	3,57	26,12
60	41	50,30	5,54	40,47
70	52	61,15	7,94	57,39
80	63	69,03	9,54	81,01
90	78	93,67	14,21	98,64
100	96	105,16	16,31	110,12
110	130	127,48	20,22	128,96
120	160	133,91	23,73	148,03

Для оцінки даних розрахунків використовувались також експериментальні дослідження, проведені у

національному Університеті Сінгапуру [5] на вільно обпертих плитах розміром 0,9x0,9 м. Навантаження виконувалось

зосередженою силою, розподіленою по площадці 0,17x0,17 м по центру. Об'єднання бетонної плити для роботи

разом зі сталевим листом виконувалось епоксидним клеєм товщиною слою 2,5 мм (рис. 3).

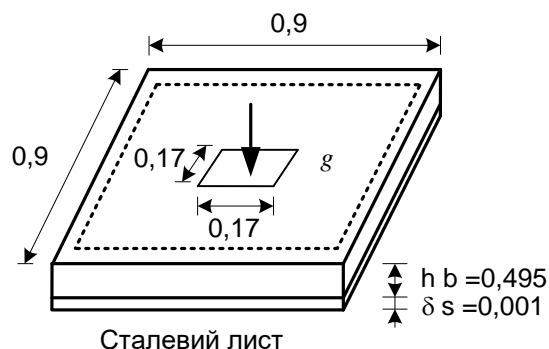


Рис. 3. Схема сталобетонної плити

На рис. 4 виконано порівняння залежностей «навантаження-прогин» для експериментальних даних, отриманих у Національному Університеті Сінгапуру і в результаті математичного моделювання. Через відсутність у роботі [5] даних про

жорсткість кесового з'єднання в розрахунку плити з'єднання листа з бетоном вважалось абсолютно жорстким, що могло призвести до зменшення розрахункових значень прогинів не більш ніж на 8 % при навантаженнях, близьких до граничних.

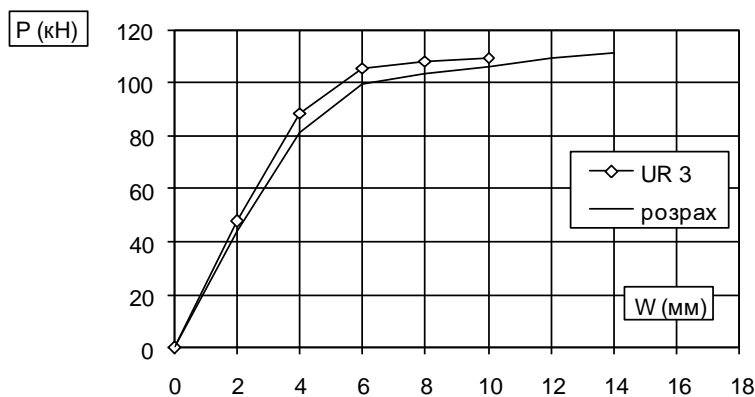


Рис. 4. Порівняння експериментальних даних Національного Університету Сінгапуру і даних математичного моделювання

Аналіз проведених на рис. 4 даних свідчить про відповідність експериментальних і розрахункових значень прогинів. Так, до навантаження 80,0 кН розбіжності в значеннях прогинів не перевищують 5 %.

Порівняння руйнівних навантажень за даними експериментальних випробувань Національного Університету Сінгапуру [5] з розрахунковими значеннями виконано в табл. 3 і свідчить про гарне співвідношення запропонованого методу розрахунку.

Порівняння розрахункових значень руйнівних навантажень з даними
Національного Університету Сінгапуру

	Висота плити, мм	Сталевий лист		Міцність бетону, МПа	Експериментальне руйнівне навантаження, кН	Розрахункове руйнівне навантаження, кН	Відсоток розбіжності, %
		товщина, мм	межа текучості, МПа				
UR3	50,5	1,00	218	48,0	111,0	115,0	4

Висновки. Таким чином, ця методика добре співвідноситься з експериментальними даними для розрахунку сталобетонних плит на дію поперечного навантаження.

Порівняння експериментальних і отриманих теоретичних даних дозволяє зробити висновок про відповідність цієї

методики розрахунку сталобетонних плит на дію зовнішнього навантаження з наявними експериментальними даними, що дає можливість подальшого вдосконалювання конструкцій із забезпеченням їх ефективної і безпечної експлуатаційної роботи.

Список літератури

1. Чихладзе, Э.Д. Несущая способность сталобетонных плит [Текст] / Э.Д. Чихладзе, А.Д. Арсланханов // Бетон и железобетон. – 1990. – № 10. – С. 30-31.
2. Арсланханов, А.Д. Исследование напряженно-деформированного и предельных состояний сталобетонных плит при статическом кратковременном нагружении [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / А.Д. Арсланханов. – Харьков, 1989. – 154 с.
3. Чихладзе, Э.Д. Напряженно-деформированное состояние элемента сталобетонной плиты при силовых и температурных воздействиях [Текст] / Э.Д. Чихладзе, С.Ю. Берестянская // Будівельні конструкції: зб. наук. праць. – К.: НДІБК, 1999. – Вип. 50. – С. 259-263.
4. Берестянская, С.Ю. Влияние повышенных и высоких температур на деформирование бетона при плоском напряженном состоянии [Текст] / С.Ю. Берестянская // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. – Рівне: РДТУ, 1999. – Вип. 3. – С. 93-97.
5. Ong K.C.G. Flexural Test of Steel-Concrete Open Sandwiches. Mays G.C., Cusens A.R. // Magazine of Concrete Research. – 1982. – Vol.34. – №120. P.P. 130-138.

Ключові слова: сталобетонна плита, зовнішнє навантаження, конструкція з зовнішнім листовим армуванням, міцність бетону, міцність сталевих листів.

Анотація

Проведено аналіз роботи конструкції з зовнішнім листовим армуванням. Показано порівняння експериментальних і теоретичних даних для різних плит, на підставі чого зроблено висновок про відповідність даної методики розрахунку сталобетонних плит на дію зовнішнього навантаження та існуючих експериментальних даних.

Проведен анализ работы конструкции с внешним листовым армированием. Показано сравнение экспериментальных и теоретических данных для различных плит, на основании чего сделан вывод о соответствии данной методики расчета сталебетонных плит на действие внешней нагрузки и существующих экспериментальных данных.

The author provides the operability analysis of construction with external sheet reinforcement. Basing on comparative analysis of theoretical and experimental results of the steel concrete slabs under the external loads the author makes the conclusion of competency of proposed methodology.

УДК 624.016.001.24

Канд. техн. наук О.В. Опанасенко

Е. Опанасенко

ВИКОРИСТАННЯ ДІАГРАМ ГРАНИЧНИХ СТАНІВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ СТАЛЕБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

USE OF CHARTS BOUNDARY CONDITIONS FOR DETERMINATION OF BEARING ABILITY THE STEEL-CONCRETE ELEMENTS

Представив д-р хім. наук, професор А.М. Плугін

Постановка проблеми. Все більше поширення в будівництві здобувають сталебетонні конструкції завдяки значній несучій здатності і надійності роботи. Використання в конструкціях різних за властивостями матеріалів сприяє зменшенню їх як матеріаломісткості, так і вартості. На підставі цього актуальною проблемою є розроблення ефективних методів зниження їх матеріаломісткості і вартості.

Аналіз основних досліджень. Як показує аналіз літературних джерел [1, 2, 3, 4], застосування сталебетонних конструкцій прямокутного перерізу з зовнішнім армуванням суцільною обоймою в каркасах промислових будівель до цього часу залишається до кінця не дослідженою задачею. Тому розроблення методів оптимізації таких конструкцій є актуальним завданням.

Формулювання цілей. Використання діаграм граничних станів (рис. 1) дає можливість виявити резерви несучої здатності конструкцій і відповідно зменшити їх вартість. Тому метою даного дослідження є розроблення методики аналізу несучої здатності сталебетонних елементів, що ґрунтується на використанні діаграм граничних станів.

Використовуючи запропоновану в роботі [6] методику, підберемо переріз сталебетонного елемента. Скористаємося спрощеною діаграмою граничних станів. Представимо діаграму несучої здатності трьома точками (рис. 2).

Точка С характеризується максимальним моментом M_{max} і відповідним значенням поздовжньої сили N_c . Будемо вважати, що залежності між M_{max} і M_T та між M_T і N_c є степеневими функціями:

$$N_T = aM_T^\alpha, \quad M_{max} = bM_T^\beta, \quad N_c = cM_T^\gamma. \quad (1)$$

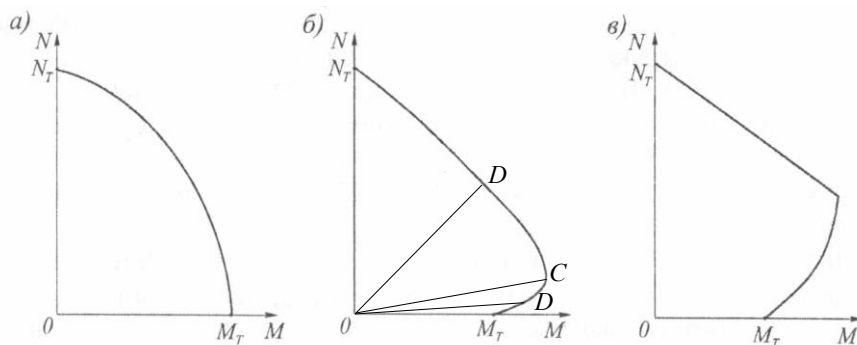


Рис. 1. Діаграми граничних станів сталевого (а), сталобетонного (б) і залізобетонного (в) елементів

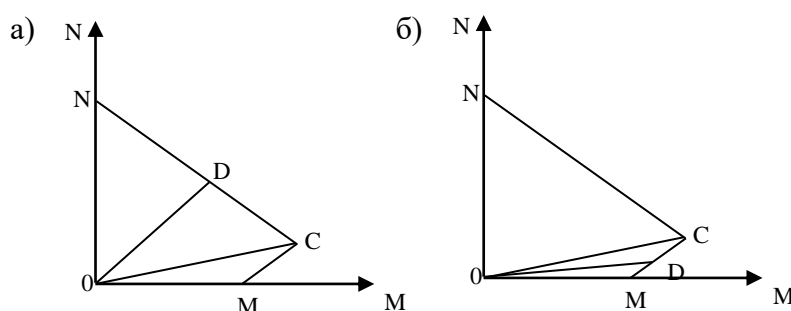


Рис. 2. Розрахункові випадки підбору перерізів сталобетонного елемента

Для визначення коефіцієнтів і показників степенів у залежностях (1) використаємо метод середніх [7].

Для визначення величин допустимого значення M_T використаємо метод послідовних наближень. Спочатку визначаємо наближене значення M_T при $N=0$, а також між N_T при $M=0$. Далі

обчислюється ексцентриситет $e=M/N$ і порівнюється з величиною $e_c=M_{max}/N_c$, оскільки перехід ексцентриситету через значення e_c призводить до зміни розрахункових формул. У випадку, коли $e \leq e_c$, вирази для обчислення граничних значень моментів і поздовжніх сил мають вигляд

$$M_d = \frac{M_{max} N_T e}{e(N_T - N_c) + M_{max}}, \quad N_d = \frac{M_{max} N_T}{e(N_T - N_c) + M_{max}}. \quad (2)$$

Аналогічно при $e \geq e_c$ (рис. 2, б) отримаємо

$$M_d = \frac{M_E N_c e}{N_c e - M_{max} + M_T}, \quad N_d = \frac{M_E N_c}{N_c e - M_{max} + M_T}. \quad (3)$$

Далі обчислюється коефіцієнт запасу $n=M_d/M$. При його відхиленні від одиниці

обчислюється нове значення M_T за формулою $M_T^{k+1} = M_T^k / n$. Зазначимо, що

викладений процес послідовних наближень має швидку збіжність. Приклади добору перерізів у кожному із розглянутих випадків наводяться нижче.

Розглянемо розрахунок поперечної рами каркаса промислової будівлі зі сталобетонних елементів. Каркас має

прогін 30 м, крок колон 12 м із двома кранами вантажопідйомністю $Q=50/10$ т кожний. Розрахункова схема рами прийнята у вигляді один раз статично невизначної системи з затисненими у фундамент колонами й шарнірно приєднаним ригелем (рис. 3).

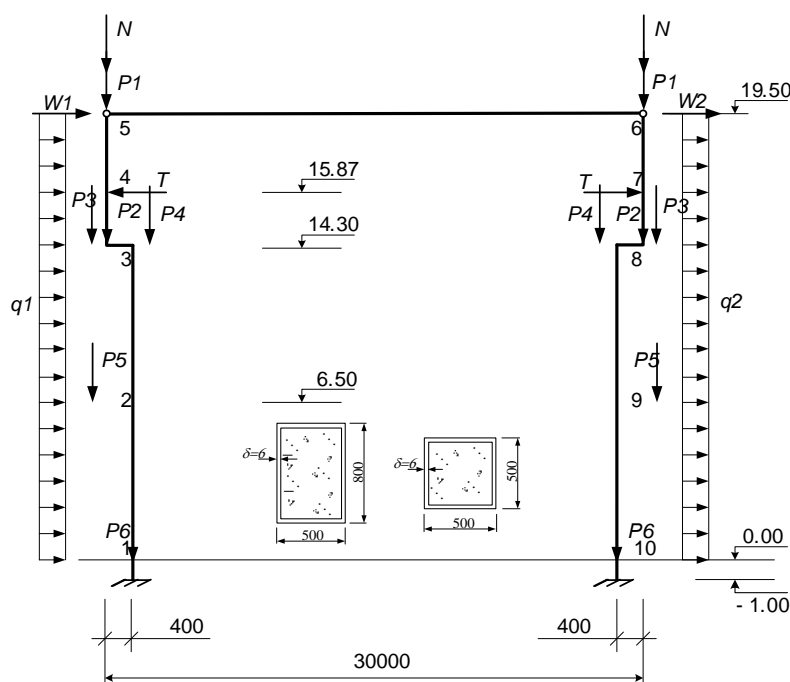


Рис. 3. Розрахункова схема рами

Результати розрахунку рами сталобетонного каркаса виконано методом кінцевих елементів з використанням програмного комплексу ЛПРА [5]. Маючи набір діаграм несучої здатності сталобетонних елементів і значення згинального моменту й поздовжньої сили можемо зробити підбір розмірів перерізів (рис. 4).

Розрахункові внутрішні сили для сталобетонного елемента мають значення: $M=74,3$ тсм і $N=150$ тс. На першому кроці, знаючи значення параметрів функціонального зв'язку, обчислюємо $M_{max}=218,17 \times 74,3^{0.360}$, $N_T=3,76 \times 74,3^{0.73}$, $N_c=5444,34 \times 74,3^{-0.93}$. За цими значеннями

обчислюємо ексцентриситети $e_c=M_{max}/N_c=0,903$ м, $e=74,3/150=0,495$. Оскільки $e < e_c$, то $M_d=81,05$ тсм, $N_d=163,63$ тс. Далі визначаємо коефіцієнт запасу $n=M_d/M=1,091$. На другому кроці обчислюємо $M_T=74,3/1,091=68,11$ тс і знаходимо відповідні йому значення M_{max} , N_T , N_c , n , M_T . І так робимо кілька наближень, поки коефіцієнт запасу не буде дорівнювати 1. У нашому випадку розрахунок закінчений при $n=1,008$, $M_{max}=78,13$ тсм, $N_T=111$ тс, $N_c=974,32$ тс, $M_d=74,92$ тсм, $N_d=151,25$ тс. Цим граничним значенням відповідають розміри перерізу сталобетонного елемента – $500 \times 500 \times 6$ мм.

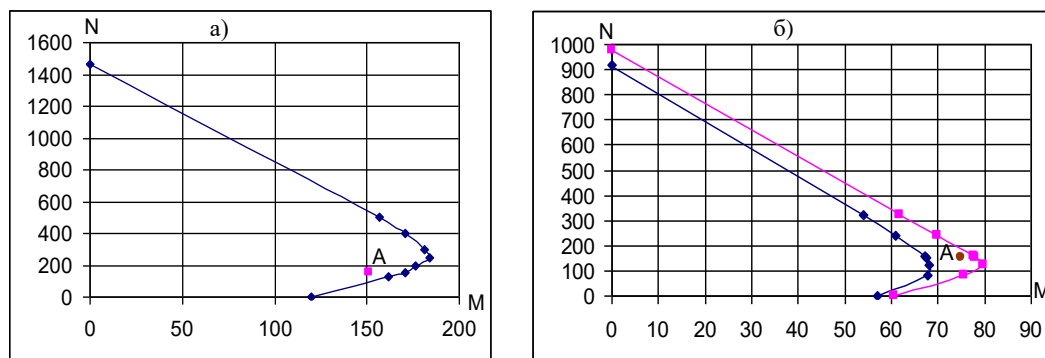


Рис. 4. Графіки несучої здатності сталобетонного елемента перерізом $800 \times 500 \times 6$ мм (а) і 500×500 з товщинами обійми 5 і 6 мм (б)

Аналогічний розрахунок робимо і для іншого перерізу. Розрахункові внутрішні сили для сталобетонного елемента мають значення: $M=151$ тсм і $N=153$ тс. Знаючи величини параметрів функціонального зв'язку, обчислюємо

$$M_{max}=12,489 \times 151^{0.560}=207,46 \text{ тсм},$$

$$N_T=416,569 \times 151^{0.261}=1546,25 \text{ тс},$$

$$N_c=187,723 \times 151^{0.061}=254,46 \text{ тс}.$$

За цими значеннями обчислюємо ексцентриситети $e_c=M_{max}/N_c=0,816$ м, $e=151/153=0,987$. Оскільки $e > e_c$, то $M_d=194,99$ тсм, $N_d=197,58$ тс. Коефіцієнт запасу $n=M_d/M=1,26$. Наступним кроком обчислюємо $M_T=151/1,26=119,62$ тсм і знаходимо відповідні йому значення $M_{max}=180,0$ тсм, $N_T=1446,47$ тс, $N_c=250,56$ тс, $M_d=158,27$ тсм, $N_d=160,05$ тс, $n=1,039$, $MT=114,13$ тсм.

Робимо друге наближення: $n=0,89$, $M_{max}=127,96$ тсм, $N_T=1233,57$ тс, $N_c=241,47$ тс, $M_d=135,59$ тсм, $N_d=137,39$ тс. Граничним значенням (приймаємо при $n=1,04$) відповідають розміри перерізу сталобетонного елемента – $800 \times 500 \times 6$ мм.

Висновки. Таким чином, на підставі проведених досліджень можна зробити висновок: маючи значення зусиль (згинальний момент і поздовжня сила) у перерізі і набір діаграм несучої здатності сталобетонного елемента прямокутного перерізу, можна, не виконуючи складних обчислень, підібрати розміри поперечного перерізу сталобетонного стержня і зробити оцінку несучої здатності каркаса промислової будівлі.

Список літератури

1. Чихладзе, Э.Д. Расчет сталобетонных элементов прямоугольного сечения на прочность при изгибе и внецентренном сжатии [Текст] / Э.Д. Чихладзе, А.Д. Арсланханов // Изв. вузов. Строительство. – 1992. – № 1. – С. 6 – 10.
2. Стороженко, Л.І. Несучі труобетонні конструкції в промислових і цивільних будівлях [Текст] / Л.І. Стороженко, В.Ф. Пенц // Будівельні конструкції: зб. наук. праць. – К.: НДІБК, 2003. – С. 39-44.
3. Грушко, И.М. Повышение прочности и выносливости бетона [Текст] / И.М. Грушко, А.Г. Ильин, Э.Д. Чихладзе. – Харьков: Вища шк., 1986. – 152 с.
4. Головкин, Г. Дослідження центрально стиснутих елементів виготовлених з сталевих труб квадратного перерізу заповнених бетоном [Текст] / Г. Головкин // Стале залізобетонні

конструкції: дослідження, проектування, будівництво, експлуатація: зб. наук. статей. – Кривий Ріг, 1998. – С. 65-68.

5. Городецкий, А.С. Информационные технологии расчета и проектирования строительных конструкций [Текст]: учеб. пособие // А.С. Городецкий, В.С. Шмуклер, А.В. Бондаренко. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. – 889 с.

6. Чихладзе, Е.Д. Спрощена діаграма граничних станів сталобетонного елемента в задачах оптимізації стержневих конструкцій [Текст] / Е.Д. Чихладзе, М.Г. Черненко // Будівельні конструкції: зб. наук. праць. – К.: НДБК, 2003. – Вип. 59. – С. 310 – 317.

7. Демидович, Б.П. Численные методы анализа [Текст] / Б.П. Демидович, И.А. Марон, Э.З. Шувалов. – М.: Физматгиз, 1963. – 400 с.

Ключові слова: оптимізація, сталобетонні конструкції, діаграми несучої здатності.

Анотації

У статті розглядається підхід до оптимізації і оцінки несучої здатності стержневих сталобетонних конструкцій прямокутного поперечного перерізу, які ґрунтуються на використанні діаграм несучої здатності сталобетонних елементів.

В статье рассматривается подход к оптимизации и оценки несущей способности стержневых сталобетонных конструкций прямоугольного поперечного сечения, который базируется на использовании диаграмм несущей способности сталобетонных элементов.

In clause the approach before optimization and an estimation of bearing ability of rod steel-concrete designs of rectangular cross-section which is based on use of diagrams of bearing ability of steel-concrete elements is considered.

УДК 624.075.23

Асп. Е.В. Игнатенко,

E. Ignatenko

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАЛБЕТОННЫХ КОЛОНН

EXPERIMENTAL RESEARCHES OF STEEL CONCRETE COLUMNS

Представил д-р техн. наук, профессор А.А. Плугин

Введение. В данной статье приведены результаты испытания коротких сталобетонных колонн квадратного сечения под воздействие кратковременного статического нагружения. В ходе эксперимента были получены результаты

несущей способности экспериментальных образцов, деформации и напряжения в металлической обойме конструкции.

Технико-экономические исследования [1] показали, что применение сталобетонных элементов для колонн промзданий

позволяет экономить до 31-55 % стали по сравнению со стальными колоннами и до 13 % – с железобетонными. Приведенные затраты снижаются в первом случае на 28-47 %, во втором – на 51-62 %. Использование сталебетонных колонн в подкрановых эстакадах позволяет экономить до 12-28 % стали по сравнению со стальными и до 9 % – с железобетонными. Приведенные затраты снижаются на 28-56 %. Из вышеизложенного следует, что развитие методик расчета существующих конструкций и внедрение в практику строительства новых конструкций является приоритетным направлением.

Основной идеей данного сталебетонного элемента является «уход» от предельного состояния по потере местной устойчивости металлической обоймы к предельному состоянию по разрушению бетонного ядра, что в свою очередь повышает несущую способность конструкции. Для изучения отмеченных особенностей работы сталебетонных колонн были проведены описанные ниже экспериментальные исследования.

Для проведения экспериментальных исследований было изготовлено пять опытных образцов. Внешний вид и геометрические размеры сталебетонных колонн приведены на рис. 1, 2. Для определения физико-механических характеристик бетона и стали были проведены стандартные испытания [2, 3].

Установлено, что $f_{yk}=240.6$ МПа,
 $E_s=2.05 \cdot 10^5$ МПа; $f_{ck,prism}=30.3$ МПа;
 $E_c=35.4 \cdot 10^3$ МПа.

Сталебетонные колонны испытывались на гидравлическом прессе ИП-2000 в лаборатории кафедры «Строительная механика и гидравлика» УкрГАЗТ.

К образцам прикладывалась осевая нагрузка. Опорные устройства обеспечивали шарнирную схему закрепления образца. В процессе испытания измерялись продольные и поперечные деформации. Для этого в образцах по всему периметру среднего по длине сечения наклеивались 24 тензодатчика: в продольном (12 тензодатчиков) и поперечном (12 тензодатчиков) направлениях.

Показания тензодатчиков снимали с помощью тензоцентрической станции ВВП-8. Нагрузку прикладывали по 100 кН до достижения 40 % предполагаемой разрушающей нагрузки, далее по 50 кН до 80 %, по 20 кН до разрушения. Отсчеты по приборам снимались на каждой ступени нагрузки: вначале один раз до уровня 50 % предполагаемой разрушающей нагрузки, дважды – после прохождения уровня 50 % предполагаемой разрушающей нагрузки.

Первый отсчет сразу после установления необходимого уровня нагрузки, второй – после пятиминутной выдержки для фиксирования изменения деформаций во времени. Все образцы доводились до разрушения.



Рис. 1. Внешний вид сталебетонных элементов перед испытанием

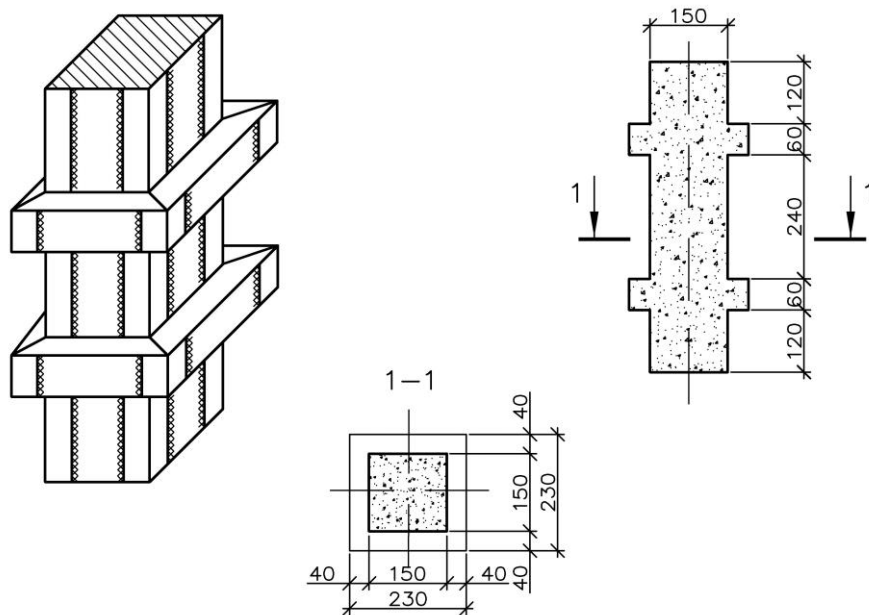


Рис. 2. Геометрические размеры сталебетонных колонн

Как известно из работы [4], при малых уровнях напряженного состояния бетонное ядро растянуто в поперечном направлении, но растягивающие напряжения не превышают напряжений, характеризующих прочность контакта между ядром и облойкой. При уровне напряженного состояния в бетоне $N/f_{ck,prism} = (0.3 \div 0.4)$ контактные нормальные силы уменьшаются и меняют знак. В процессе обжатия контактные касательные силы достигают предельных значений, равных силам сцепления между бетоном и облойкой, и выключаются из работы. Для определения величины выпучивания стенок конструкции были установлены индикаторы часового типа (рис. 3). В

момент, предшествующий разрушению образцов, показание ИНЗ колебалось от 2.4 до 2.8 мм, тогда как показания ИН1 и ИН2 менялись от 1.05 до 1.25 мм и 0.95 до 1.18 мм соответственно. Показания индикаторов подтверждают, что в момент, предшествующий разрушению, бетонное ядро и металлическая облойка работают совместно только в углах конструкции. Визуальный осмотр конструкции подтвердил, что после разрушения углы облойки остались практически недеформированными. Следовательно, можно утверждать, что разрушение элемента происходит вследствие разрушения бетонного ядра.

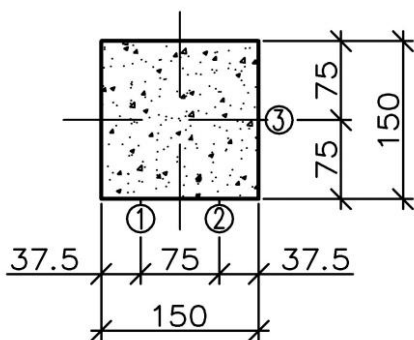


Рис. 3. Расположение индикаторов часового типа относительно поперечного сечения колонны

Как видно из рис. 4, на первых этапах загрузения зависимости продольных и поперечных деформаций от нагрузки близки к линейным. Далее линейность

нарушается и при нагрузках 0.75-0.85 разрушающей наблюдается интенсивный рост продольных, и в большей степени, поперечных деформаций.

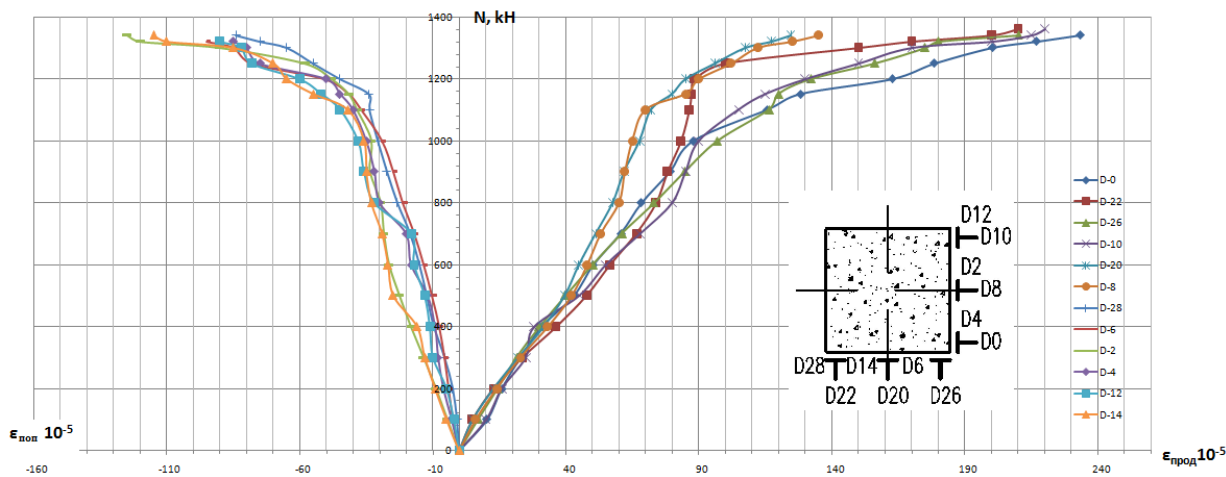


Рис. 4. Графики изменения продольных и поперечных деформаций оболочки при центральном сжатии в образце № 9

Как показали экспериментальные исследования, продольные напряжения в обойме сталебетонных колонн в момент разрушения равны $1.08f_{yk}$.

На рис. 5, а, показан внешний вид сталебетонного элемента после разрушения. Визуальный осмотр подтвердил отсутствие признаков потери местной или общей устойчивости металлической обоймы.

После испытания образцов был произведен демонтаж металлической оболочки, что и выявило полное разрушение бетона в угловых зонах, что еще раз доказывает справедливость предположения о наступлении предельного состояния вследствие разрушения бетонного ядра, и подтверждает теорию о наибольшем обжатии бетонного ядра в угловых зонах (рис. 5, б).

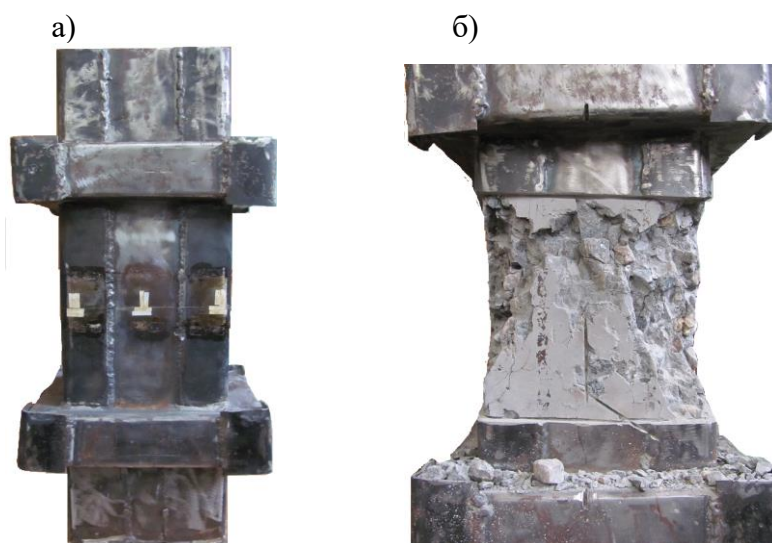


Рис. 5. Экспериментальные образцы после испытания:
а) внешний вид образца; б) с демонтированной металлической обоймой

Выводы. В результате испытания коротких сталебетонных колонн были получены данные о характере их напряженно-деформированного состояния на различных этапах нагружения.

Проведенные экспериментальные исследования позволили отметить следующее:

1. В сталебетонных колоннах обойма работает по схеме четырех шарнирно-опертых пластин.

2. Наличие продольных гофр «переводит» предельное состояние конструкции от местной потери устойчивости металлической оболочки, к предельному состоянию по разрушению бетонного ядра.

Список литературы

1. Стороженко, Л.И. Труробетонные конструкции [Текст] / Л.И. Стороженко. – К.: Будівельник, 1978. – 80 с.
2. ГОСТ 12004-81. Сталь арматурная. Методы испытания на растяжение [Текст]. – М.: Госстандарт, 1981. – 20 с.
3. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками: ДСТУ Б В.2.7-214:2009. - НДІБК, Київ, 2009.
4. Чихладзе, Э.Д. Расчет сталебетонных элементов прямоугольного сечения на прочность при осевом сжатии [Текст] / Э.Д. Чихладзе, А.Д. Арсланханов // Бетон и железобетон. – 1993. – № 1. – С. 13-15.

Ключевые слова: сталебетонная колонна, стальная обойма, бетонное ядро, объемное напряженное состояние, потеря устойчивости, разрушение бетонного ядра.

Аннотации

Проведено експериментальні дослідження сталебетонних колон. Доведено, що металева обойма сталебетонних колон працює за схемою чотирьох шарнірно-опертих пластин. Підтверджена справедливність твердження, що наявність поперечних гофр запобігає втраті місцевої стійкості металевої обойми конструкції та призводить до вичерпання несучої здатності за рахунок руйнування бетонного ядра.

Проведены экспериментальные исследования сталебетонных колонн. Доказано, что металлическая обойма сталебетонных колонн работает по схеме четырех шарнирно-опертых пластин. Подтверждена справедливость утверждения, что наличие поперечных гофр уводит конструкцию от потери местной устойчивости металлической оболочки и приводит к разрушению вследствие разрушения бетонного ядра.

The experimental researches of steel concrete columns were provided. It is proved that the metal cage of steel concrete columns works as four hinged supported plates. The author confirmed the statement validity that the cross crimps help to avoid local buckling of metal case. The exhaustion of carrying capacity occurs due to destruction of concrete core.

*Канд. техн. наук В.А. Борщов (УкрДАЗТ),
викладачі Т.Є. Богданова (Чугуївський
професійний аграрний ліцей),
І.М. Гришина (Харківський коледж
транспортних технологій),
д-р фіз.-мат. наук А.М. Ніколенко (УкрДАЗТ)*

*V.A. Borschov, T.E. Bogdanova,
I.M. Gryshyna, A.M. Nikolenko*

МІРИ ДІЇ СИЛИ В МЕХАНІЦІ

MEASURES OF FORCE ACTION IN MECHANICS

Вступ. Класичні розділи фізики є найбільш розробленими на сьогодні як у плані теоретичних обґрунтувань, так і стосовно поглиблень теорії з орієнтацією на практичні потреби. Особливо сказане стосується класичної механіки, досить згадати класичні підручники Г. Голдстейна [1] та М.М. Нікітіна [2]. Те саме можна сказати й про викладання основ класичної механіки в курсі загальної фізики.

Проте, як не дивно, навіть як розділ загальної фізики, класична механіка не позбавлена моделей, що призводять до парадоксів за умови неадекватного застосування цих моделей (досить нагадати таку, здавалося б просту модель, як «матеріальна точка»), і дивних узагальнень при визначенні фізичних величин.

Тому слід звернути увагу не тільки на необхідність прозорості та доступності викладу основних понять, але насамперед на відповідність цих понять їхньому глибинному фізичному змісту.

Постановка задачі. Мета даної статті полягає в тому, щоб послідовно проаналізувати визначення міри дії сил у механіці (мається на увазі імпульс сили та механічна робота), проте хоча зазначені фізичні величини відіграють важливу роль у цьому розділі фізики, їх визначення є, на наш погляд, далекими від дійсно

адекватних. У першу чергу це стосується механічної роботи.

Виклад основного матеріалу. Сила \vec{F} в механіці є векторною фізичною величиною, що являє собою міру механічної дії на дане матеріальне тіло інших тіл. Ця дія викликає зміну швидкостей точок тіла або деформацію його й може бути реалізована як за умов безпосереднього контакту тіл, так і за умов їх польових взаємодій.

У динаміці сила є однією з основних фізичних величин. Зауважимо, проте, що можливою є побудова такої механіки, яка взагалі не містить такої фізичної величини, як сила [3].

Отже, якщо сила описує механічні дії одних фізичних систем на інші, то повинна бути їй відповідна міра, як фізична величина. Але таких мір не одна, а дві. Щоб розібратися в ситуації, зробимо дуже короткий екскурс в історію механіки.

У 1686 р. Г. Лейбніц дійшов висновку, що динамічні властивості тіл визначаються величиною, пропорційною добутку маси m тіла на квадрат його швидкості \vec{V} (тобто mV^2). Ця величина була названа ним живою силою. При цьому Г. Лейбніц вважав, що кількість руху $\vec{P} = m\vec{V}$, як міра механічного руху,

запропонована Р. Декартом у 1644 р., може бути лише мірою статичних взаємодій, які він назвав «мертвими силами». Дещо пізніше до виразу «живої сили» було

додано множник $\frac{1}{2}$. Впродовж XVII-XIX ст. продовжувалася полеміка з цього приводу, основний аргумент якої полягав у тім, що не може існувати двох різних мір руху ($m\vec{V}$ та $\frac{mV^2}{2}$). Лише на початку

XX ст. зі створенням релятивістської механіки було остаточно з'ясовано, що існує дійсно дві міри механічного руху: кількість руху та кінетична енергія, які є компонентами однієї міри руху – тензора енергії – імпульсу. А це у свою чергу означає, що повинні існувати і дві міри дії сили. Так воно і є, йдеться про імпульс сили \vec{I} та роботу сили W .

Імпульс сили \vec{I} є векторною фізичною величиною, що являє собою часову міру дії сили і визначається через елементарний імпульс сили $d\vec{I}$:

$$d\vec{I} = \vec{F}dt, \quad (1a)$$

Отже,

$$W = \int_{\eta_1}^{\eta_2} \vec{F}d\vec{r} = \int_{\eta_1}^{\eta_2} m \frac{d\vec{V}}{dt} d\vec{r} = \frac{mV_2^2}{2} - \frac{mV_1^2}{2}. \quad (4)$$

Тут і починаються невідповідності з трактуванням механічної роботи. З самого визначення елементарної роботи (3a) випливає, що вона, як скалярний добуток двох векторів \vec{F} та $d\vec{r}$ ($dW = \vec{F}d\vec{r} \cdot \cos\Theta$, де Θ кут між векторами \vec{F} та $d\vec{r}$), може дорівнювати нулю в трьох випадках:

$$\vec{F} = 0 \Rightarrow dW = 0, \quad (5a)$$

$$\vec{I} = \int_{t_1}^{t_2} \vec{F}dt. \quad (1б)$$

Між іншим, величина \vec{I} та імпульс тіла як міра руху пов'язані між собою:

$$\vec{I} = \int_{t_1}^{t_2} m \frac{d\vec{V}}{dt} dt = m\vec{V}_2 - m\vec{V}_1. \quad (2)$$

Робота сили W є скалярною фізичною величиною, що являє собою просторову міру дії сили і визначається через елементарну роботу dW сили \vec{F} при елементарному лінійному переміщенні тіла $d\vec{r}$:

$$dW = \vec{F}d\vec{r}, \quad (3a)$$

Отже,

$$W = \int_{\eta_1}^{\eta_2} \vec{F}d\vec{r}. \quad (3б)$$

Робота сили W та кінетична енергія тіла $T = \frac{1}{2}mV^2$ теж пов'язані між собою:

$$d\vec{r} = 0 \Rightarrow dW = 0, \quad (5б)$$

$$\Theta = \frac{\pi}{2} \Rightarrow dW = 0, \quad (5в)$$

а може бути і від'ємною:

$$\Theta > \frac{\pi}{2} \Rightarrow dW < 0. \quad (6)$$

Що стосується формул (5а) та (5б), то тут все зрозуміло: немає сили чи переміщення, то немає і роботи. Випадок (5в) більш складний: він може бути реалізований, коли діє гіроскопічна сила. Проте автори стандартних підручників запевняють, що така реалізація можлива, коли діє, наприклад, нормальна реакція опори. Попри все випадок (6) можна формально реалізувати, коли діє сила тертя. Тобто робиться нічим не обґрунтований висновок, що механічна робота систем сил, які діють на тіло, дорівнює сумі окремих робіт окремих сил. З формальної математичної позиції з цим можна було б погодитися, якби не глибоке розуміння того, що механічну роботу виконує рівнодійна сила. Що ж стосується реакцій (сила тертя, нормальна реакція опори тощо), то вони окремих робіт не виконують і не можуть виконувати.

Щоб обґрунтувати цей висновок, слід звернутися до термодинаміки. Перший принцип термодинаміки стверджує, що внутрішня енергія термодинамічної

системи dU змінюється за рахунок теплопередачі dQ та за рахунок виконання роботи dW :

$$dU = dQ - dW . \quad (7)$$

Дисипативні сили, такі як сила тертя, не виконують роботи: у даному разі відбувається розсіювання енергії.

Отже, слід все-таки поставити крапку в питанні щодо визначення механічної роботи, а саме: механічну роботу слід визначати як роботу рівнодійної сили. Додамо, що робота, як і теплота, є, по суті, різними формами передачі енергії.

Висновки. Аналіз визначення механічної роботи дозволяє зробити висновок, що цю роботу виконує рівнодійна сила і лише вона одна. Твердження про механічну роботу як про суму робіт всіх сил, що діють на систему, заперечується першим принципом термодинаміки.

Список літератури

1. Голдстейн, Г. Классическая механика [Текст] / Г. Голдстейн. – М.: Наука, 1975. – 416 с.
2. Никитин, Н.Н. Курс теоретической механики [Текст] / Н.Н. Никитин. – М.: Высш. шк., 1990. – 607 с.
3. Герц, Г. Принципы механики, изложенные в новой связи [Текст] / Г. Герц. – М.: АН СССР, 1959. – 386 с.

Ключові слова: сила, імпульс сили, механічна робота, робота рівнодійної сили, перший принцип термодинаміки.

Анотації

Проблему визначення механічної роботи, як міри просторової дії сили, проаналізовано з позиції фізичного змісту цієї величини. Показано, що механічну роботу системи сил, які діють на тіло, не можна розглядати як суму робіт окремих сил, бо вона є роботою рівнодійної сили. Саме цей висновок відповідає першому принципу термодинаміки.

Проблему определения механической работы, как меры пространственного действия силы, проанализировано с позиции физического содержания этой величины. Показано, что механическую работу системы сил, действующих на тело, нельзя рассматривать как сумму

работ отдельных сил, поскольку она является работой равнодействующей силы. Именно этот вывод соответствует первому принципу термодинамики.

The problem of the determination of the mechanical work as of spatial action measure of force is analysed from position of the physical connotation of this value. It is indicated that the mechanical work of the forces system, which acting on body, it is impossible to consider as amount of the work of separate forces since it is a resultant force work. Exactly this conclusion corresponds with the first principle of the thermodynamics.

УДК 519.254+519.233.5+519.654

*Кандидаты техн. наук В.А. Борщев, И.М. Егорова (УкрГАЗТ),
преподаватель И.Н. Гришина (Харьковский колледж
транспортных технологий),
д-р физ.-мат. наук А.Н. Николенко (УкрГАЗТ)*

*V.A. Borshev, I.M. Yegorova,
I.N. Grishyna, A.N. Nikolenko*

АЛГОРИТМ И ПРОГРАММА ЧИСЛЕННОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПАРНОЙ РЕГРЕССИИ ПРОИЗВОЛЬНОГО ОБЩЕГО ВИДА

ALGORITHM AND PROGRAM OF NUMERAL RENEWAL OF ARBITRARY GENERAL VIEW PAIR REGRESSION

Введение. При решении многих прикладных научных задач, в силу определенных сложностей в разработке математических моделей, возникает необходимость проведения физического эксперимента на предметной модели либо натурального эксперимента. Обработка полученных результатов экспериментальных исследований может включать несколько этапов: предварительный анализ и первичная обработка данных; анализ структуры и тесноты статистической связи между исследуемыми переменными – корреляционный анализ; исследование вида зависимости между количественными переменными – регрессионный анализ; дисперсионный анализ и другое. Наиболее сложным этапом, требующим значительных затрат времени и искусства

исследователя, является регрессионный анализ.

Анализ последних достижений. Регрессионный анализ предусматривает: подбор класса функций, в рамках которого производится дальнейший поиск неизвестной функции регрессии; нахождение параметров (коэффициентов) функции регрессии данного класса с последующим анализом точности полученного уравнения связи.

Сформулированные рабочие гипотезы об общем виде искомой функции регрессии могут быть проверены с привлечением соответствующих математико-статистических критериев. Эти критерии базируются, прежде всего, на идее компромисса между сложностью регрессионной модели и точностью ее оценивания [1].

Оценивание неизвестных значений параметров, входящих в уравнение регрессионной зависимости, в большинстве случаев можно получить с использованием метода наименьших квадратов (МНК-оценок). В классических предположениях МНК-оценки совпадают с оценками максимального правдоподобия и являются наилучшими среди всех несмещенных оценок [1]. Существующие методы получения МНК-оценок, как правило, основаны на использовании классов линейных функций или классов функций, которые путем соответствующих преобразований могут быть приведены к классу линейных функций.

Постановка задачи. Восстановление парной регрессии произвольного общего вида $y = y(x)$, в общем случае нелинейной, по ограниченной выборке с использованием МНК-оценок может быть сведено к нахождению на множестве классов функций

$$F = \bigcup_k \{f_k(x, \mathbf{a})\}, \quad (1)$$

где $f_k(x, \mathbf{a})$ – функция подобранного класса;

\mathbf{a} – параметр, $\mathbf{a} = (a_0, \dots, a_m)_k$, функции, наиболее близкой к регрессии $y = y(x)$, минимизирующей функционал.

$$I[f(x, \mathbf{a})] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i, \mathbf{a})]^2, \quad (2)$$

где n – объем выборки $\{x_i, y_i\}$.

Размерность векторного параметра \mathbf{a} различна для функций, принадлежащих разным классам. Компоненты векторного параметра \mathbf{a} представляют собой $m+1$ неизвестных параметров (коэффициентов) функции подобранного класса.

Функционал (2) при известной функции подобранного класса

$Y = f_k(x, \mathbf{a})$ представляет функцию $I(\mathbf{a}) = I[f_k(x, \mathbf{a})]$ переменного параметра $\mathbf{a} = (a_0, \dots, a_m)_k$ с точкой минимума $\mathbf{a}^* = (a_0^*, \dots, a_m^*)_k$:

$$I(\mathbf{a}^*) \rightarrow \min. \quad (3)$$

Для оценки качества функции $Y^* = f_k(x, \mathbf{a}^*)$, аппроксимирующей регрессию $y = y(x)$ и удовлетворяющей условию (3), обычно используется средне-квадратичное значение регрессионного остатка

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [y_i - f_k(x_i, \mathbf{a}^*)]^2}. \quad (4)$$

Таким образом, восстановление по выборке ограниченного объема парной регрессии, в общем случае нелинейной, может быть сведено к нахождению конечного множества оптимальных решений (2), (3) – $\mathbf{a}^* = (a_0^*, \dots, a_m^*)_k$ для различных функций $Y = f_k(x, \mathbf{a})$ подобранных классов множества (1). Из конечного множества функций различных классов, для которых найдены точки минимума $\mathbf{a}^* = (a_0^*, \dots, a_m^*)_k$, как решение рассматриваемой задачи, наиболее близкое к регрессии, может быть выбрана функция $Y^* = f^*(x, \mathbf{a}^*)$, удовлетворяющая условию

$$I(Y^*) = \inf_F \{I[f_k(x, \mathbf{a}^*)]\}. \quad (5)$$

Этому соответствует наименьшее значение регрессионного остатка (4).

Основной материал. Для подобранного класса функций $Y = f_k(x, \mathbf{a})$ алгоритм численного нахождения точки минимума (3) при числе переменных

$m+1$ ($\mathbf{a}^* = (a_0^*, \dots, a_m^*)_k$) может быть реализован с использованием методов нелинейного программирования. Как показал опыт решения подобных задач, эффективным является метод прямого поиска Хука-Дживса [2]. Метод состоит из последовательности шагов исследующего поиска вокруг базисной точки, а затем в случае успеха – поиска по образцу. Для рассматриваемой задачи этот метод сводится к следующему:

1. Выбрать начальную базисную точку \mathbf{aBasis}_1 и шаг длиной h для каждой переменной a_i , $i = \overline{0, m}$.

2. Вычислить $I(\mathbf{a})$ в базисной точке ($\mathbf{a} = \mathbf{aBasis}_1$) с целью получения сведений о локальном поведении функции $I(\mathbf{a})$. Эти сведения будут использоваться для нахождения подходящего направления поиска по образцу, с помощью которого можно надеяться достичь большего убывания значения функции. Функция $I(\mathbf{a})$ в базисной точке \mathbf{aBasis}_1 находится следующим образом:

2.1. Вычисляется значение функции $I(\mathbf{aBasis}_1)$ в базисной точке.

2.2. Каждая переменная по очереди изменяется прибавлением длины шага. Таким образом, вычисляется значение функции $I(\mathbf{aBasis}_1 + h\mathbf{e}_0)$, где \mathbf{e}_0 – единичный вектор в направлении оси a_0 . Если это приводит к уменьшению значения функции, то \mathbf{aBasis}_1 заменяется на $\mathbf{aBasis}_1 + h\mathbf{e}_0$. В противном случае вычисляется значение функции $I(\mathbf{aBasis}_1 - h\mathbf{e}_0)$, и если ее значение уменьшилось, то \mathbf{aBasis}_1 заменяем на $\mathbf{aBasis}_1 - h\mathbf{e}_0$. Если ни один из проделанных шагов не приводит к уменьшению значения функции, то точка \mathbf{aBasis}_1 остается неизменной и рассматриваются изменения в направлении оси a_1 , т. е.

находится значение функции $I(\mathbf{aBasis}_1 + h\mathbf{e}_1)$ и т. д. Когда будут рассмотрены все $m+1$ переменные, мы будем иметь новую базисную точку \mathbf{aBasis}_2 .

2.3. Если $\mathbf{aBasis}_2 = \mathbf{aBasis}_1$, т. е. уменьшение функции не было достигнуто, то исследование повторяется вокруг той же базисной точки \mathbf{aBasis}_1 , но с уменьшенной длиной шага. На практике удовлетворительным является уменьшение шага в десять раз от начальной длины.

2.4. Если $\mathbf{aBasis}_2 \neq \mathbf{aBasis}_1$ то производится поиск по образцу.

3. При поиске по образцу используется информация, полученная в процессе исследования (п. 2), и минимизация функции завершается поиском в направлении, заданном образцом. Это производится следующим образом:

3.1. Разумно двигаться из базисной точки \mathbf{aBasis}_2 в направлении $\mathbf{aBasis}_2 - \mathbf{aBasis}_1$, поскольку поиск в этом направлении уже привел к уменьшению значения функции. Поэтому вычислим функцию $I(\mathbf{a})$ в точке образца $\mathbf{aPoint}_1 = \mathbf{aBasis}_1 + 2(\mathbf{aBasis}_2 - \mathbf{aBasis}_1)$.

В общем случае на любом j -м шаге функция $I(\mathbf{a})$ вычисляется в точке $\mathbf{aPoint}_j = \mathbf{aBasis}_j + 2(\mathbf{aBasis}_{j+1} - \mathbf{aBasis}_j)$.

3.2. Затем исследование следует продолжать вокруг точки \mathbf{aPoint}_1 (в общем случае – вокруг точки \mathbf{aPoint}_j).

3.3. Если наименьшее значение на шаге 3.2 меньше значения в базисной точке \mathbf{aBasis}_2 (в общем случае \mathbf{aBasis}_{j+1}), то получают новую базисную точку \mathbf{aBasis}_3 (\mathbf{aBasis}_{j+2}), после чего следует повторить шаг 3.1. В противном случае не производить поиск по образцу из точки \mathbf{aBasis}_2 (в общем случае \mathbf{aBasis}_{j+1}), а

продолжить исследования в точке $aBasis_2$ ($aBasis_{j+1}$).

4. Завершить этот процесс, когда длина шага будет уменьшена до заданного малого значения.

На рис. 1 приведен исходный код модуля программы на языке программирования высокого уровня, реализующей алгоритм численного нахождения точки минимума $\mathbf{a}^* = (a_0^*, \dots, a_m^*)_k$ и регрессионного остатка (4) для подобранного класса функций.

```

Unit Regres;
interface
  uses RegTypes; {Внешний модуль описания подобранного класса
  функций}
  var
    D:real; {Делитель шага}
  procedure ParRegresCoef(n,NumCoef:integer; X,Y:XYType;
    var a:aType; RegFunct:RegrFunctType;
    h,hmin:real; var S:real)
{Подпрограмма вычисления коэффициентов парной регрессии
Параметры:
  n - число пар наблюдений;
  NumCoef - число коэффициентов парной регрессии;
  X,Y - массивы значений фактора X и функции отклика Y,
  Y[i]=f(X[i]), i=1..n;
  a - массив значений коэффициентов функции парной регрессии
  a[i],i=0..NumCoef - 1;
  RegFunct - идентификатор функции регрессии;
  h - начальный шаг варьирования коэффициентов парной
  регрессии;
  hmin - минимальное значение шага варьирования коэффициентов
  парной регрессии;
  S - среднеквадратичное отклонение, определенное по сумме
  квадратов регрессионных остатков.}
implementation
  procedure ParRegresCoef;
  var
    i :integer;
    aIter, aPoint, aBasis :aType;
    Sum,SumI,SumB :real;
    IsBasis :boolean;
  function SquSum(a:aType):real;
  var
    i :integer;
    Sum :real;
  begin
    Sum:=0;

```

Рис. 1. Исходный код модуля программы (начало)

```
    for i:=1 to n do
        Sum:=Sum+sqr(RegrFunct(a,X[i])-Y[i]);
        SquSum:=Sum;
    end;
begin
{Минимизация с использованием метода Хука-Дживса}
    aIter:=a;
    aPoint:=a;
    aBasis:=a;
    SumI:=SquSum(a);
    IsBasis:=True;
    SumB:=SumI;
    repeat
        i:=0;
        while i<NumCoef do
            begin
{Вариации коэффициентов регрессии}
                a[i]:=aIter[i]+h;
                Sum:=SquSum(a);
                if Sum<SumI then
                    aIter[i]:=a[i]
                else
                    begin
                        a[i]:=aIter[i]-h;
                        Sum:=SquSum(a);
                        if Sum<SumI then
                            aIter[i]:=a[i]
                        else
                            a[i]:=aIter[i];
                    end;
                SumI:=SquSum(a);
                i:=i+1;

            end;
        if SumI<SumB then
            begin
{Поиск по образцу}
                for i:=0 to NumCoef-1 do
                    begin
                        aPoint[i]:=2*aIter[i]-aBasis[i];
                        aBasis[i]:=aIter[i];
                        a[i]:=aPoint[i];
                        aIter[i]:=a[i];
                    end;
            end;
        end;
    end;
end;
```

Рис. 1. Исходный код модуля программы (продолжение)


```

SumB:=SumI;
IsBasis:=False;
SumI:=SquSum(a);
end
else
begin
if not IsBasis then
begin
{Замена базисной точки}
aPoint:=aBasis;
aIter:=aBasis;
a:=aBasis;
SumI:=SquSum(a);
IsBasis:=True;
SumB:=SumI;
end
else
begin
h:=h/D;
if h<(hmin/D) then
begin
a:=aPoint;
S:=sqrt(SquSum(a)/(n-1));
Exit;
end;
end;
end;
until False;
end;
End.

```

Рис. 1. Исходный код модуля программы (окончание)

Функция предварительно подобранного класса $Y = f_k(x, \mathbf{a})$, передаваемая в подпрограмму **ParRegresCoef** в виде параметра **RegFunct** (см. рис. 1), описывается в отдельном модуле. На рис. 2, как пример использования такой функции вида $y = a_0 + a_1 e^{-a_2 x}$, приводится исходный код модуля её описания.

Выводы. На основе продолжительного опыта использования предложены эффективный алгоритм численного восстановления функции парной регрессии произвольного общего вида по выборке ограниченного объема и программа на языке программирования, реализующая этот алгоритм.

```
Unit RegTypes; {Модуль описания вида функции парной регрессии
подобранного класса}
interface
const
  nmax=500; NumCoefmax=10;
type
  aType=array [0..NumCoefmax-1] of real;
  XYType=array [1..nmax] of real;
  RegrFunctType=function( a:aType; x:real ):real;
var
  h,hmin :real;{Начальный и минимальный шаги варьирования
коэффициентов парной регрессии }
  NumCoef :integer;{Число коэффициентов функции парной
регрессии }
  a :aType;{Массив значений коэффициентов функции парной
регрессии a[i],i=0..NumCoef - 1 }
  function RegFunct(a:aType; x:real):real;{Функция регрессии}
implementation
  {$F+}
  function RegFunct;
  begin
    {Экспоненциальная функция регрессии}
    RegFunct:= a[0]+a[1]*exp(a[2]*(-x));
  end;
begin
  NumCoef:=3;
End.
```

Рис. 2. Пример исходного кода программного модуля описания функции подобранного класса

Список литературы

1. Айвазян, С.А. Прикладная статистика: Исследование зависимостей [Текст]: справ. издание / С.А. Айвазян, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин; под ред. С.А. Айвазяна. – М.: Финансы и статистика, 1985. – 487 с.
2. Банди, Б. Методы оптимизации [Текст]: Вводный курс / Брайан Д. Банди; пер. с англ. О.В. Шихеевой под ред. В.А. Волынского. – М.: Радио и связь, 1988. – 128 с.

Ключевые слова: обработка данных, нелинейная парная регрессия, метод наименьших квадратов, численный алгоритм, метод прямого поиска, вычислительная программа.

Аннотации

Описано чисельний метод відновлення парної регресії довільного загального вигляду, у т. ч. нелінійної, з використанням МНК-оцінок. Наведено алгоритм і програму обчислювальної обробки даних, які реалізують цей метод.

Описан численный метод восстановления парной регрессии произвольного общего вида, в т. ч. нелинейной, с использованием МНК-оценок. Приведены алгоритм и программа вычислительной обработки данных, реализующие этот метод.

With the use of least-squares method estimations the numeral method of renewal of arbitrary general view pair regression, including nonlinear, is described. Which realize this method, the algorithm and the program of the calculable processing of data is resulted.

УДК 625.144.5

*Д-р техн. наук А.П. Нестеров (УИПА),
инж. С.В. Удовикова*

*A.P. Nesterov,
S.V. Udovikova*

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЭЛЕВАТОРА С КОВШАМИ С ПОДВИЖНЫМИ ДНИЩАМИ ПОЛУКРУГЛОЙ ФОРМЫ

HIGHER EFFICIENCY OF A BUCKET ELEVATOR WITH A HALF-ROUND MOVABLE BOTTOM

Введение. Как известно эффективность работы элеваторных установок во многом зависят от параметров данного элеватора, типа их грузонесущих органов, условий их разгрузки.

Задачами исследований является создание конструкций элеваторов и их ковшей с улучшенной разгрузкой материала из последних и без отсутствия обратной сыпи материала при движении ковшей элеватора как по нисходящим ветвям (цепям), так и по восходящим ветвям (цепям) элеватора.

Актуальность темы. Для повышения производительности элеваторов, улучшения условий их работы за последнее время создано большое количество ковшей специальных конструкций.

Кафедрой СППРМ УкрДАЗТа было выполнено ряд работ, направленных на повышение производительности наклонных ковшовых элеваторов.

В частности, предложены новые конструкции рабочих органов погрузочно-разгрузочных машин – ковшей с подвижными днищами и дополнительными приспособлениями к ним, которые имеют больший объем в сравнении с его прототипом, могут перемещать больший объем материала за счет своей углубленной части, приводят материал в движение за счет подвижного днища, установленного в углубленной части данного ковша. Такие конструкции ковшей наклонных элеваторов соответственно имеют и больший коэффициент наполнения материалом, что в свою очередь влияет на производительность элеватора с установленными на нем новейшими конструкциями ковшей с подвижными днищами [4-9].

Подвижный элемент ковша – днище определенной формы (сокращенно ПФ) и дополнительное устройство к нему – шкив, установленный на приводном валу

элеватора, это те малые конструктивные изменения, внесенные в конструкцию элеватора, которые позволят повысить производительность элеваторных установок [12].

Центрбежная разгрузка материала из ковшей с подвижными днищами позволяет осуществить на разгрузочном участке элеватора следующие условия, оказывающие влияние на его производительность: подвижное днище ковша, установленное в его углубленной части, скользя по отжимному устройству, позволит привести материал в движение, что будет предотвращать слеживаемость материала и ускорять процесс разгрузки материала из ковшей с подвижными днищами полукруглой формы; уменьшить угол поворота ковша ПФ на разгрузочном участке элеватора (после захода его на приводные звёздочки), на котором центрбежная сила прижимает материал в ковше к его углублениям, что способствует слеживаемости материала; улучшить разгрузку материала как из боковин ковша, так и из его углублённой части за счёт увеличения угла и времени разгрузки ковшей с подвижными днищами полукруглой формы после прохождения ковшом полюса; пренебречь формой подвижного днища ковша, так как

разгрузка материала из ковша ПФ происходит через его переднюю стенку; предотвратить удар струи материала о стенку впереди идущих ковшей, что повысит качество транспортируемого материала и сохранность ковшей ПФ, у которых крепление подвижного днища находится на внешней стороне передних его стенок [13-15].

Цель статьи. На примере предлагаемой новейшей конструкции ковша с подвижным днищем полукруглой формы наклонного элеватора показать, что можно значительно повысить производительность данной элеваторной установки за счёт правильно подобранных параметров элеватора.

Изложение основного материала. Производительность устройств непрерывного действия всегда определяется количеством материала, попавшего в систему или проследовавшего через поперечное сечение любого её элемента и покинувшего её в принятую для измерения единицу времени [10, 11].

Производительность элеватора с ковшом (О)* рассчитывается по существующей зависимости, но с учётом объёма материала, перемещаемого данным ковшом (при различной его ширине $B = 448\text{мм}$ и

$$P = \frac{3,6 \cdot 0,83 \cdot \left[\begin{array}{l} \text{объём} \\ \text{материала} \end{array} \right]}{0,203} = 14,72 \cdot \left[\begin{array}{l} \text{объём} \\ \text{материала} \end{array} \right].$$

Теоретическая производительность элеватора с установленными на нём ковшами ПФ* выражена такой же зависимостью, но только с учётом объёма материала, находящегося в ковше ПФ, при различной его ширине V_M ($B = 448\text{мм}$)

или V'_M ($P = 3,6 \cdot \left[\begin{array}{l} \text{объём} \\ \text{материала} \end{array} \right] \cdot \frac{V'_c}{a_k}$).

Примечание. *Сокращения обозначений форм ковшей: ПФ – ковш с подвижным днищем полукруглой формы; (О) – ковш, конструкция которого является основой для создания ковша ПФ, отличающегося от ковша серийного производства конфигурацией боковой стенки (параметры элеваторов с ковшами – (О) и ПФ одинаковы.

Весовая производительность $\Pi_в$, т/ч, определяется по ниже приведенным зависимостям. При скорости цепи $V_ц = 0,83$ м/с

$$\Pi_в = 3,6 \cdot \left[\frac{\text{объём}}{\text{материала}} \right] \cdot \frac{V_ц}{a_к} \cdot \gamma; \quad (1)$$

$$\Pi_в = \frac{3,6 \cdot 0,83 \cdot \left[\frac{\text{объём}}{\text{материала}} \right] \cdot 0,85}{0,203} = K_в \cdot \left[\frac{\text{объём}}{\text{материала}} \right],$$

где $K_в$ – коэффициент, $K_в = 12,51$.

Объёмная производительность Π , м³/ч, определяется по ниже приведенным зависимостям. При скорости цепи $V_ц = 0,83$ м/с

$$\Pi = 3,6 \cdot \left[\frac{\text{объём}}{\text{материала}} \right] \cdot \frac{V_ц}{a_к}; \quad (2)$$

$$\Pi = \frac{3,6 \cdot 0,83 \cdot \left[\frac{\text{объём}}{\text{материала}} \right]}{0,203} = K_в \cdot \left[\frac{\text{объём}}{\text{материала}} \right],$$

где $K_в$ – коэффициент, $K_в = 14,72$.

В общем виде формулу для определения весовой производительности элеватора можно записать так:

$$\Pi_в = 3,6 \cdot \frac{V_ц}{a_к} \cdot m. \quad (3)$$

Масса материала, перемещаемого ковшем ПФ, определяется по формуле

$$m = \left[\frac{\text{объём}}{\text{материала}} \right] \cdot \gamma. \quad (4)$$

Центры тяжести поперечных сечений фигур материала, расположенных в той или иной части ковша ПФ, обозначим так: для материала, расположенного в боковинах

ковша ПФ, при зачерпывании и разгрузке: $G_{\rho=25^\circ \text{ б}}^з$ и $G_{\rho=25^\circ \text{ б}}^п$, $G_{\rho=35^\circ \text{ б}}^з$ и $G_{\rho=35^\circ \text{ б}}^п$, $G_{\rho=45^\circ \text{ б}}^з$ и $G_{\rho=45^\circ \text{ б}}^п$, для материала, расположенного в углублённой части ковша ПФ, соответственно при зачерпывании и разгрузке: $G_{\rho=25^\circ \text{ у.ч.}}^з$ и $G_{\rho=25^\circ \text{ у.ч.}}^п$, $G_{\rho=35^\circ \text{ у.ч.}}^з$ и $G_{\rho=35^\circ \text{ у.ч.}}^п$, $G_{\rho=45^\circ \text{ у.ч.}}^з$ и $G_{\rho=45^\circ \text{ у.ч.}}^п$ (см. рисунок). Найдем центр тяжести ковша ПФ с материалом при перемещении подвижного днища ковша ПФ из положения зачерпывания в положение разгрузки (при повороте подвижного днища ковша ПФ на угол 15°). Средний центр тяжести $G_{\rho=45^\circ}^з$ поперечных

сечений фигур материала, расположенных как в боковинах ковша ПФ – $G_{\rho=45^0 \delta}^3$, так и в его углублённой части – $G_{\rho=45^0 \text{ у.ч.}}^3$ (при опущенном днище ковша ПФ), найден из формулы $(G_{\rho=45^0 \delta}^3 + G_{\rho=45^0 \text{ у.ч.}}^3) / 2 = G_{\rho=45^0}^3$. Средний центр тяжести $G_{\rho=45^0}^p$ поперечных сечений фигур материала, расположенных как в боковинах ковша ПФ – $G_{\rho=45^0 \delta}^p$, так и в его углублённой части – $G_{\rho=45^0 \text{ у.ч.}}^p$ (при отжатом днище ковша ПФ), найден из формулы $(G_{\rho=45^0 \text{ у.ч.}}^p + G_{\rho=45^0 \delta}^p) / 2 = G_{\rho=45^0}^p$. Средний центр тяжести ковша ПФ $G_{\text{ПФ}\rho=45^0}^3$

находится между центром тяжести $G_{\rho=45^0}^3$ поперечных сечений фигур материала и центром тяжести порожнего ковша ПФ $G_{\text{ПФпор}}^3$ (при опущенном днище): $(G_{\rho=45^0}^3 + G_{\text{ПФпор}}^3) / 2 = G_{\text{ПФ}\rho=45^0}^3$. Средний центр тяжести ковша ПФ $G_{\text{ПФ}\rho=45^0}^p$ находится между центром тяжести $G_{\rho=45^0}^p$ поперечных сечений фигур материала и центром тяжести порожнего ковша ПФ $G_{\text{ПФпор}}^p$ (при отжатом днище): $(G_{\rho=45^0}^p + G_{\text{ПФпор}}^p) / 2 = G_{\text{ПФ}\rho=45^0}^p$ (см. рисунок).

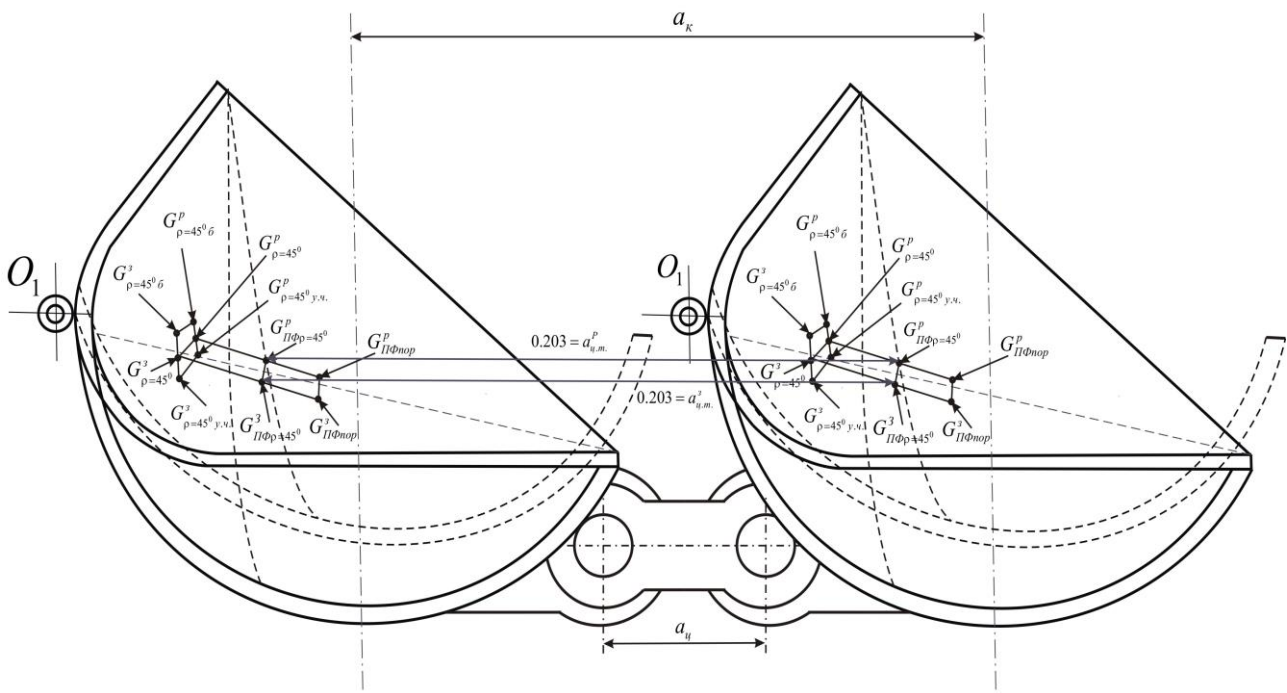


Рис. Расстояние между центрами тяжести ковшей ПФ, закреплённых на цепях с шагом a_u

В цепном наклонном элеваторе с ковшами ПФ шаг ковшей ПФ кратен шагу цепи: $a_k = 4 \cdot a_u$ [1, 2, 3]. При этом подвижное днище ковша не изменяет шаг ковшей и находится в радиусе окружности, описываемой вокруг каждого ковша ПФ.

Шаг ковшей ПФ можно также представить в следующем виде: при зачерпывании ковшем ПФ материала (днище опущено) $a_k \approx a_{u.m}^3$, где $a_{u.m}^3$ – расстояние между центрами тяжести $G_{\text{ПФ}\rho=45^0}^3$

каждого из 2 ковшей ПФ, закреплённых на цепях с шагом a_k : при разгрузке материала из ковша ПФ (днище отжато) $a_k \approx a_{ц.т.}^p$, где $a_{ц.т.}^3$ – расстояние между центрами тяжести $G_{ПФ\rho=45^\circ}^p$ каждого из 2 ковшей ПФ, закреплённых на цепях с шагом a_k . Шаг ковшей ПФ можно представить и в следующем виде: $a_{ц.т.}^p = 4 \cdot a_{ц.т.}^3$ или $a_{ц.т.}^3 = 4 \cdot a_{ц.т.}^p$.

Производительность весовая запишется так:

- при зачерпывании материала (днище опущено):

$$P_в = 3,6 \cdot \left[\begin{array}{l} \text{объём} \\ \text{материала} \end{array} \right] \cdot \frac{V_{ц.т.}}{a_{ц.т.}^3} \cdot \gamma; \quad (5)$$

- при разгрузке материала из ковша ПФ (днище отжато):

$$P_в = 3,6 \cdot \left[\begin{array}{l} \text{объём} \\ \text{материала} \end{array} \right] \cdot \frac{V_{ц.т.}}{a_{ц.т.}^p} \cdot \gamma. \quad (6)$$

Расчёты выполнены для средних значений угла естественного откоса перемещаемого ковшем ПФ материала: $\rho = 25^\circ$, $\rho = 35^\circ$, $\rho = 45^\circ$.

Выводы. Таким образом, на повышение производительности работы элеваторов с установленными на нём ковшами ПФ в значительной степени влияют следующие основные факторы: объём ковша ПФ, форма ковша ПФ и его геометрические размеры, объём материала, перегружаемого данным ковшем, шаг и расположение ковшей ПФ на тяговом органе, вид и угол начала разгрузки материала из ковша ПФ и качество разгрузки материала из последнего, повышенная скорость цепей элеватора, отсутствие обратной сыпи материала из ковшей ПФ элеватора, что обеспечено правильно подобранными основными параметрами данного элеватора.

Список литературы

1. Александров, М.П. Подъёмно-транспортные машины [Текст]: учебник / М.П. Александров. – 6-е изд. – М.: Высш. шк., 1985. – 520 с.
2. Гальперин, М.И. Строительные машины [Текст]: учеб. по спец. «Пром. и гражд. стр-во» / М.И. Гальперин, Н.Г. Домбровский. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1980. – 344 с.
3. Гринкевич, П.С. Строительные машины [Текст]: учеб. для вузов / П.С. Гринкевич. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1975. – 486 с.
4. Заявка 93101226, МКИ⁵В65G17/36. Ковшовый элеватор [Текст] / Ф.В. Верташов, Б.М. Стефанов, С.В. Удовікова (Україна); заявл. 05.04.93; опубл. 1.11.93, Бюл. № 7. – 6 с.
5. Заявка 94086604, МКИ⁵В65G17/36. Ковшовый элеватор [Текст] / Б.М. Стефанов, С.В. Удовікова, В.С. Шевчук, В.О. Ротін (Україна); заявл. 09.08.94; опубл. 29.12.94, Бюл. № 8. – 5 с.
6. Заявка а 200501343, МКИ⁵В65G17/36. Ковшовый элеватор [Текст] / Б.М. Стефанов, С.В. Удовікова (Україна); заявл. 14.02.2005. – 8 с.
7. Заявка 20041109534, МКИ⁵В65G17/36. Ковшовый элеватор [Текст] / Б.М. Стефанов, С.В. Удовікова (Україна); заявл. 22.11.2004. – 8 с.
8. Заявка а 200503203, МКИ⁵В65G17/36. Ковшовый элеватор [Текст] / Б.М. Стефанов, С.В. Удовікова (Україна); заявл. 06.04.2005. – 8 с.
9. Заявка а 200503204, МКИ⁵В65G17/36. Ковшовый элеватор [Текст] / Б.М. Стефанов, С.В. Удовікова (Україна); заявл. 06.04.2005. – 8 с.

10. Зенков, Р.Л. Машины непрерывного транспорта [Текст]: учеб. для студ. вузов, обучающихся по спец.: «Подъёмно-транспортные машины и оборудование» / Р.Л. Зенков. – М.: Машиностроение, 1987. – 432 с.

11. Мачульский, И.И. Подъёмно-транспортные и погрузочно-разгрузочные машины на ж. д. транспорте [Текст]: учеб. для студ. вузов ж. д. тр - та. / И.И. Мачульский, В.С. Киреев. – М.: Транспорт, 1989. – 319 с.

12. Ковшовый елеватор [Текст]: пат. 10729А, Україна: МПК⁵В65G17/36 / Стефанов Б.М., Удовікова С.В. – № 95010320; заяв. 23.01.95; опубл. 25.12.96, Бюл. № 4. – 4 с.

13. Удовікова, С.В. Улучшенные условия разгрузки материала из ковшей с подвижными днищами полукруглой формы наклонного элеватора [Текст] / С.В. Удовікова // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2010. – Вип. 113. – С. 198 - 202.

14. Удовікова, С.В. Определённое расположение ковша, с подвижным днищем полукруглой формы, на различных участках наклонного элеватора [Текст] / С.В. Удовікова // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2011. – Вип. 122. – С. 305 - 309.

15. Удовікова, С.В. Математична модель руху частки в ковші з рухомим днищем напівкруглої форми [Текст] / С.В. Удовікова // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2012. – Вип. 129. – С. 196 - 200.

Ключевые слова: ковшовый элеватор, ковш с подвижным днищем полукруглой формы (ПФ).

Аннотации

Були розглянуті питання підвищення продуктивності ковшового елеватора та наведені нові формули розрахунку теоретичної продуктивності ковшового елеватора.

Были рассмотрены вопросы повышения производительности ковшового элеватора и представлены новые формулы расчёта теоретической производительности ковшового элеватора.

It has been considered problems of higher efficiency of a bucket elevator and provided new formulas of calculate the theoretical efficiency of a bucket elevator.

**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ УКРАЇНСЬКОЇ ДЕРЖАВНОЇ
АКАДЕМІЇ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

**ZBIRNIK NAUKOVIH PRAC' UKRAINS'KOI DERZAVNOI AKADEMII
ZALIZNICNOGO TRANSPORTU**

Випуск 138

Збірник включено до переліку №1 наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (Постанова президії ВАК України № 1-05/4 від 26 травня 2010 р.)

Статті друкуються мовою оригіналу.

Відповідальний за випуск Борзяк О.С.

Редактори: Буранова Н.В., Еткало О.О.,
Ібрагімова Н.В., Решетилова В.В.

КВ № 8617 від 06.04.2004 р. Підписано до друку 29.05.2013 р.

Формат паперу 60x84 1/8. Папір писальний.

Умовн.-друк.арк. 14,0. Тираж 105. Замовлення № .

Видавець Українська державна академія залізничного транспорту,
61050, Харків-50, майдан Фейєрбаха, 7.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2874 від 12.06.2007 р.

Виготовлювач ТОВ «Енергозберігаючі технології»

61050, Харків, Харківська набережна, 8.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1360 від 19.05.2003 р.