



## БЕТОН

ЭТА МАНГА ПРО ЗАМЕЧАТЕЛЬНЫЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ БЕТОН И СООРУЖЕНИЯ ИЗ НЕГО. ПЕРВЫМИ НАЧАЛИ ИСПОЛЬЗОВАТЬ БЕТОН ДРЕВНИЕ РИМЛЯНЕ - ИЗ НЕГО БЫЛИ ПОСТРОЕНЫ ДОРОГИ, МОСТЫ, ПОРТЫ, ХРАМЫ, ПЛОЩАДИ, СИСТЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ, МНОГИЕ ИЗ КОТОРЫХ ДОШЛИ ДО НАШЕГО ВРЕМЕНИ. ВМЕСТЕ С МАЛЬЧИКОМ КЕНАЗИ, СТУДЕНТОМ ФАКУЛЬТЕТА АРХИТЕКТУРЫ, И ДЕВОНКОЙ СИБЫЛ ВЫ УЗНАЕТЕ, ЧЕМ ДРЕВНЕРИМСКИЙ БЕТОН ОТЛИЧАЕТСЯ ОТ СОВРЕМЕННОГО, ПРОГУЛЯЕТЕСЬ ПО МОСТУ ХИДЗИРИ-БАСИ И СХОДИТЕ НА ЦЕМЕНТНЫЙ ЗАВОД ХУКАГАВА.

ЦЕЛЬЮ КНИГИ ЯВЛЯЕТСЯ РАЗВИТИЕ ИНТЕРЕСА К СОВРЕМЕННЫМ СТРОИТЕЛЬНЫМ МАТЕРИАЛАМ И ТЕХНОЛОГИЯМ СТРОИТЕЛЬСТВА СЛОЖНЫХ СООРУЖЕНИЙ У ШКОЛЬНИКОВ СТАРШИХ КЛАССОВ, СТУДЕНТОВ И ПРОСТО ШИРОКОГО КРУГА ЧИТАТЕЛЕЙ.

Интернет-магазин: [www.dmkpress.com](http://www.dmkpress.com)

Оптовая продажа: КТК "Галактика"  
books@allians-kniga.ru



ISBN 978-5-97060-658-2



9 785970 606582 >

# БЕТОН

Исида Тэцуя  
Харуо

ЗАНИМАТЕЛЬНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО  
БЕТОН



Исида Тэцуя  
Харуо  
Trend-Pro Co., Ltd.



**Занимательное строительство**

**Бетон**

**Манга**

著作権保護コンテンツ

# マンガでわかる コンクリート

石田 哲也 / 著 はるお / 作画 トレンド・プロ / 制作



**OHM**  
Ohmsha

ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ МАНГА

# ЗАНИМАТЕЛЬНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

## БЕТОН

Тэцуя Исида

Художник Харуо

Перевод

С. Л. Плехановой



Москва  
ДМК Пресс, 2019

УДК 691.3  
ББК 38.33  
И85

### **Исида Т., Харуо**

И85 Занимательное строительство. Бетон. Манга / Тэцуя Исида (автор), Харуо (худ.); пер. с яп. С. Л. Плехановой. — М.: ДМК Пресс, 2019. — 210 с. : ил. — (Серия «Образовательная манга»). — Доп. тит. л. яп.

ISBN 978-5-97060-658-2

Эта манга про замечательный строительный материал бетон и сооружения из него. Первыми начали использовать бетон древние римляне – из него были построены дороги, мосты, порты, храмы, площади, системы водоснабжения, многие из которых дошли до нашего времени. Вместе с мальчиком Кендзи, студентом факультета архитектуры, и девочкой Сибил вы узнаете, чем древнеримский бетон отличается от современного, прогуляетесь по мосту Хидзирибаси и сходите на цементный завод Хукагава.

Целью книги является развитие интереса к современным строительным материалам и технологиям строительства сложных сооружений у школьников старших классов, студентов и просто широкого круга читателей.

УДК 691.3

ББК 38.33

Manga de wakarū Konkuri-to. (Manga Guide: Concrete)

By Tetsuya Ishida (Author), Haruo (Illustration)

Published by Ohmsha, Ltd.

Russian language edition copyright © 2019 by DMK Press

Все права защищены. Никакая часть этого издания не может быть воспроизведена в любой форме или любыми средствами, электронными или механическими, включая фотографирование, ксерокопирование или иные средства копирования или сохранения информации, без письменного разрешения издательства.

ISBN 978-4-274-06860-7 (яп.)  
ISBN 978-5-97060-658-2 (рус.)

Copyright © 2011 by and Office sawa, Ltd.  
© Издание, перевод, ДМК Пресс, 2019

# ПРЕДСЛОВИЕ

Данная книга является справочником по бетону как по наиболее распространенному строительному материалу. Бетон является незаменимым компонентом в цивилизованной повседневной жизни. Не кажется ли вам, что, несмотря на почти повсеместное распространение бетона, в действительности мы сравнительно мало знаем о его сущности? Бывало, что когда меня спрашивали о теме моей дипломной работы и я отвечал, что занимаюсь изучением бетона, зачастую реакцией было недоуменное выражение лица собеседника. Я допускаю, что бетон как не слишком бросающийся в глаза в повседневной жизни материал не ассоциируется с определённой научной сферой и оттого не воспринимается многими в качестве объекта для научного исследования.

Несмотря на то что бетон используется тысячелетиями, технологии его применения продолжают непрерывно развиваться и по сей день. Исследования в области материалов, проектных чертежей, бетонирования и эксплуатационного контроля ведутся с целью производства более прочного и долговечного бетонного строительного материала для различных функций. Бетонная отрасль подразделяется на производство бетонных материалов и конструирование бетонной продукции. Данное пособие подробно рассматривает особенности бетонных материалов, рассказывая о сущности применяющей их инженерии.

Касательно читателей, я надеюсь, эта книга привлечет внимание таких лиц, как:

- специалистов по гражданскому строительству, архитектуре и строительной технике, изучавших данные дисциплины в университетах, технических училищах и технических институтах и желающих в дальнейшем обучаться бетонному делу;
- любителей архитектурных сооружений, гражданских зданий массового строительства и инфраструктуры;
- рядовых читателей, интересующихся сущностью бетона, о котором, несмотря на повсеместное распространение, мало что известно простому обывателю.

Книга состоит из шести глав.

Книга написана так, что прочтения частей с мангой должно быть достаточно для получения общего представления о бетоне. Если же вы хотите глубже усвоить информацию, рекомендуем ознакомиться с дополнительным материалом, прилагаемым в каждой главе манги.

Надеюсь, что после прочтения этого пособия многие смогут заново ощутить близость бетона, играющего незаменимую роль физической опоры в нашей жизни.

*Сентябрь 2011 года  
Исида Тэцуя*

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>Предисловие</b> .....	v
<b>Пролог. Внезапная встреча</b> .....	1
<b>Глава 1. Что такое бетон?</b> .....	9
1.1. Из чего сделан бетон? .....	12
1.2. О заполнителях бетона .....	19
1.3. О цементе .....	22
1.4. Бетон вокруг нас .....	25
Дополнительный материал .....	31
Что такое бетон .....	31
Бетон, идущий в ногу со временем .....	32
Подбор состава бетона .....	33
Преимущества и недостатки бетона .....	34
Механические свойства бетона .....	34
Составные части бетона .....	35
О заполнителях бетона .....	37
О портландцементе .....	38
<b>Глава 2. С каких пор используется бетон?</b> .....	41
2.1. Происхождение бетона .....	44
2.2. Бетон Древнего Рима .....	47
1.3. Применение бетона в Японии .....	50
1.4. Долговечность бетона .....	52
Дополнительные справки .....	57
Бетон Древнего мира .....	57
Использование примесей для бетона .....	59

История появления бетона в Японии (строительство порта Отару и столетняя проверка бетона на прочность).....	60
Долговечность бетона.....	62

### **Глава 3. Свойства бетонной смеси и реакция гидратации** .....

3.1. Свойства бетонной смеси.....	69
3.2. Механизм реакции гидратации.....	77
Дополнительный материал.....	83
Свойства бетонной смеси и строительство из бетона.....	83
Распływ конуса бетонной смеси.....	85
Работоспособность бетона.....	86
Самоуплотняющийся бетон.....	88
Суперпластификатор АЕ.....	89
Реакция гидратации с цементом.....	91
Зависимость реакции гидратации от температуры.....	93

### **Глава 4. Созревание бетона.**

#### **Дефекты на начальном этапе**.....

4.1. Созревание бетона .....	102
4.2. Термические трещины.....	106
4.3. Трещины из-за усадки при высыхании .....	110
4.4. Способы борьбы с трещинами .....	112
Дополнительный материал.....	117
Микроструктура затвердевающего цемента .....	117
Реакция гидратации и прочность бетона .....	119
Трещины из-за выделения теплоты при гидратации .....	122
Трещины при усадке .....	124

### **Глава 5. Долговечность бетонных конструкций**.....

5.1. Разрушение бетонных конструкций.....	130
5.2. Причины коррозии арматуры .....	132
5.2.1. Ионы хлорида.....	132
5.2.2. Нейтрализация .....	135

5.3. Способы защиты от коррозии арматуры .....	138
5.4. Разрушение самого бетона.....	140
Дополнительный материал.....	150
Долговечность бетонных конструкций.....	150
Коррозия арматуры .....	150
Процесс разрушения .....	152
Проникновение хлорид-ионов внутрь бетона .....	154
Нейтрализация бетона (карбонизация).....	157
Щёлочно-силикатная реакция.....	161
Заморозка/оттаивание.....	163
Химическая эрозия .....	164

## **Глава 6. Разные виды бетона..... 167**

6.1. Высокоч прочный бетон с хорошей деформируемостью .....	171
6.2. Бетон, который можно использовать в воде .....	174
6.3. Бетон для прибрежных зон .....	176
6.4. Бетон как материал для наружных стен .....	178
6.5. Бетон, умеющий восстанавливаться.....	179
6.6. Бетон, используемый на поверхности Луны .....	181
Дополнительный материал.....	191
Разные виды бетона .....	191
Сверхпрочный бетон, армированный фиброй бетон .....	191
Проницаемый бетон.....	193
Самовосстанавливающийся бетон .....	194
Лунный бетон.....	195

ПРОЛОГ

# ВНЕЗАПНАЯ ВСТРЕЧА



Эта встреча была внезапной...

ПОСТУПИВ ВЕСНОЮ НА КАФЕДРУ  
АРХИТЕКТУРЫ, Я ПОСЕТИЛ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МУЗЕЙ  
ЗАПАДНОГО ИСКУССТВА.

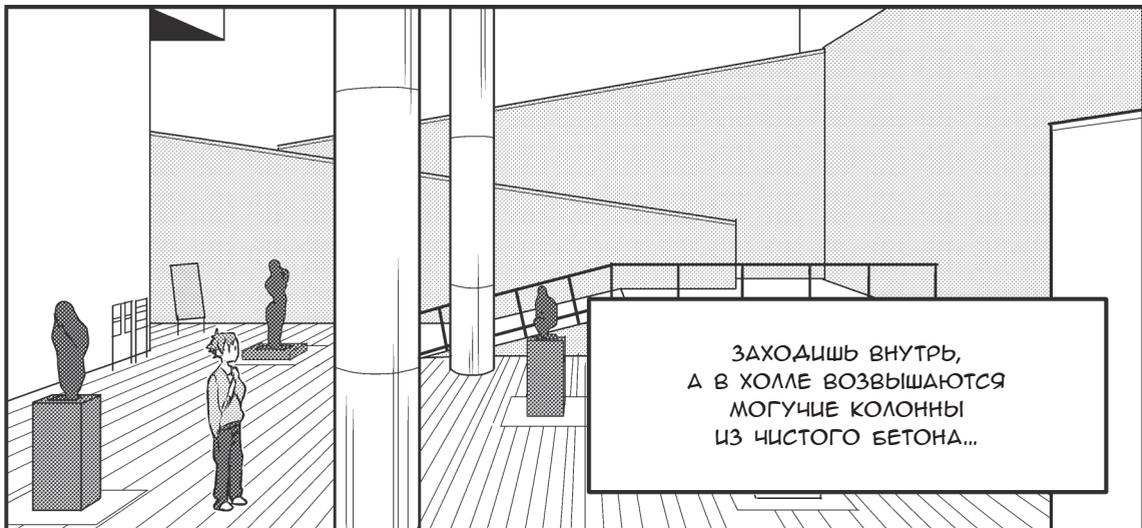


НЕ РАДИ ЭКСПОНАТОВ,  
А РАДИ ОЗНАКОМЛЕНИЯ  
С АРХИТЕКТУРОЙ  
САМОГО МУЗЕЯ...



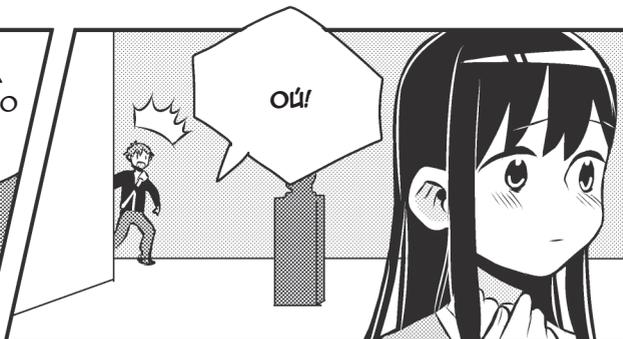
НАЦИОНАЛЬНЫЙ МУЗЕЙ ЗАПАДНОГО ИСКУССТВА  
БЫЛ ПОСТРОЕН ФРАНЦУЗСКИМ АРХИТЕКТОРОМ  
ЛЕ КОРЬЮЗЬЕ, КОТОРОГО НАЗЫВАЮТ  
ОЦОМ СОВРЕМЕННОЙ АРХИТЕКТУРЫ.

СТРОИТЕЛЬСТВО МУЗЕЯ ЗАВЕРШИЛОСЬ  
В 1959 ГОДУ. ЭТА ПОСТРОЙКА ЯВЛЯЕТСЯ  
ПРИМЕРОМ НОВАТОРСКОГО РЕШЕНИЯ -  
ПРИМЕНЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА  
В АРХИТЕКТУРЕ.





На следующей неделе...



В СМЫСЛЕ?  
ВЫ ЖЕ НА ПРОШЛОЙ НЕДЕЛЕ МНЕ ЗДЕСЬ  
СКАЗАЛИ "ТЫ МНЕ НРАВИШЬСЯ"...

ЭТО РАЗВЕ БЫЛО  
НЕ В МОЙ  
ДАРЕС...

А,

АГА-А!!!

???

о-ох...

ПРОСТИТЕ,  
ПОЖАЛУЙСТА...

ДЕЛО В ТОМ,  
ЧТО Я ОЧЕНЬ ЛЮБЛЮ  
БЕТОН...

И ПОЭТОМУ  
КАЖДЫЙ РАЗ НЕОСОЗНАННО  
НАЧИНАЮ РАЗГОВАРИВАТЬ  
С ПРЕДМЕТАМИ,  
СДЕЛАННЫМИ  
ИЗ БЕТОНА...

ХА-ХА-ХА...

ЭТО БЫЛО  
В ДАРЕС  
БЕТОНА...

**БЕТОНА?!**

СТРАННО,  
ПРАВДА?

ПОВЛЕНИЕ  
СЛЕЗЫ



ЧТО ВЫ, НИЧЕГО СТРАННОГО В ЭТОМ НЕТ!  
Я ТОЖЕ ОЧЕНЬ ЛЮБЛЮ АРХИТЕКТУРУ  
И ПРИШЕЛ СЮДА, ЧТОБЫ ПОСМОТРЕТЬ  
НА САМО ЗАДНИЕ МУЗЕЯ!!



**АХ!**

ДА ЧТО ВЫ ГОВОРИТЕ?!



ЕСЛИ ВАС ИНТЕРЕСУЕТ БЕТОН,  
МОЖЕТЕ ЗАДАВАТЬ МНЕ  
ПРО НЕГО ЛЮБЫЕ ВОПРОСЫ!!!



НУ, В СМЫСЛЕ...

Я ПОКА  
ТОЛЬКО СОВСЕМ НЕДАВНО  
ПОСТУПИЛ НА КАФЕДРУ АРХИТЕКТУРЫ  
И ПОЭТОМУ НЕ ЗНАЮ НИКАКИХ  
ПОДРОБНОСТЕЙ...

Я НА СЛЕДУЮЩЕЙ НЕДЕЛЕ  
СОБИРАЮСЬ ЦАТИ НА МОСТ  
ХИАЗИРИБАСИ В ОТЯНОМЦАЗУ!



это...

если вы не против,  
можно и я поїду с вами?  
тогда и расскажете  
про бетон!

ої... конечно!!



я ведь  
еще не представился...  
меня зовут  
сुнахара кенази!

Кстати...

а меня зовут  
мизуно сибил.  
будем знакомы!



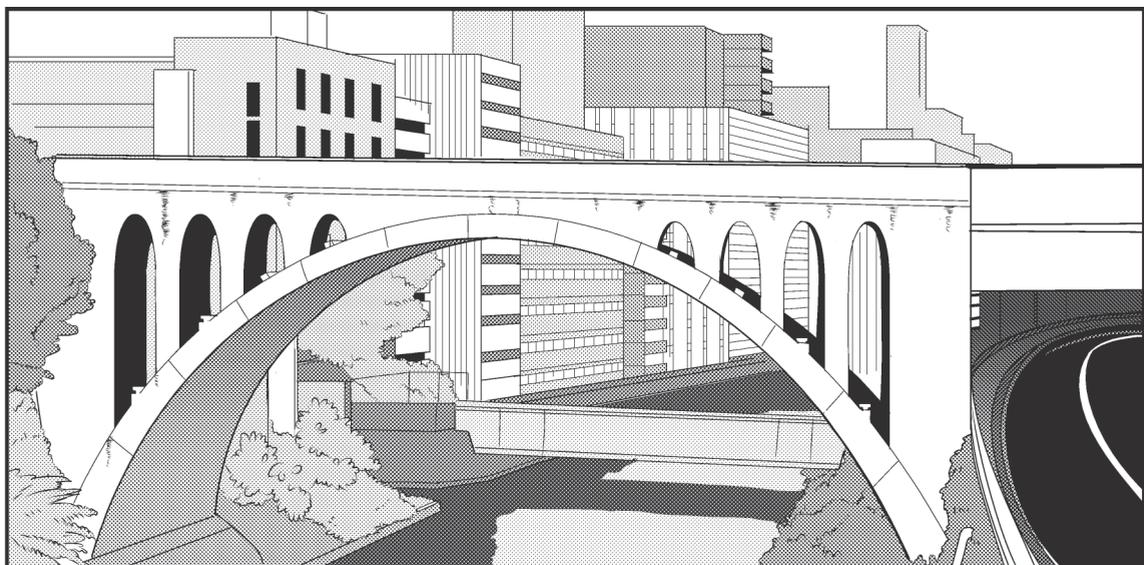
И тут я понял...

...что это я влюбился с первого взгляда.

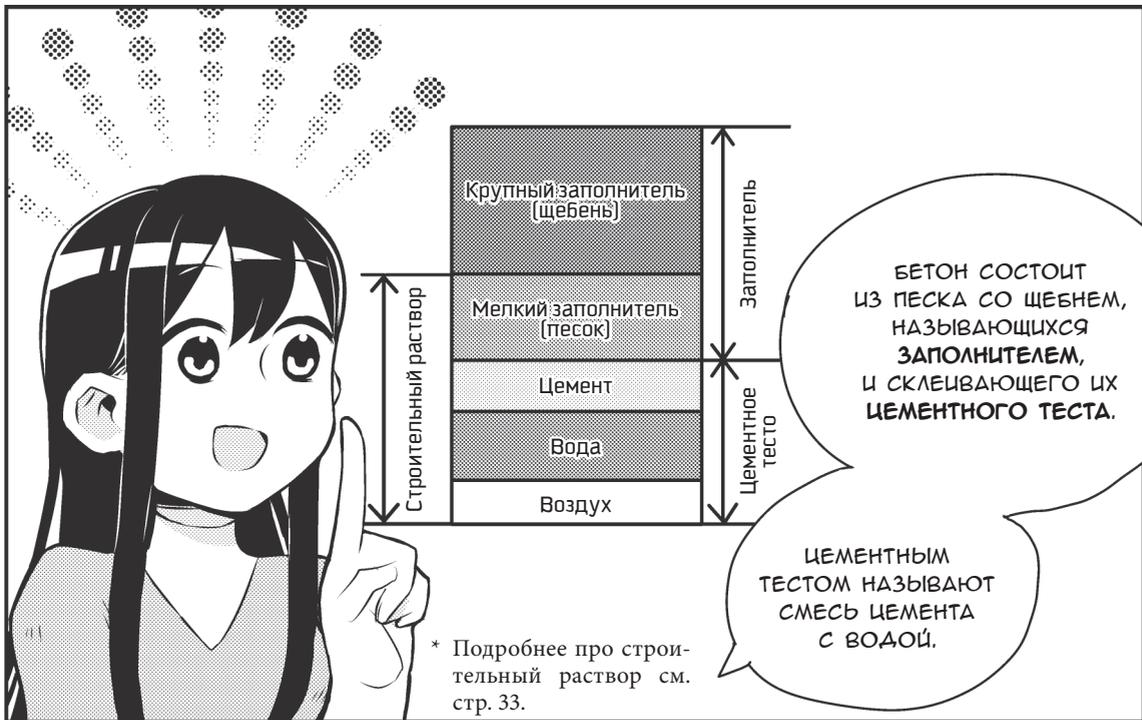
ГЛАВА 1

# ЧТО ТАКОЕ БЕТОН?









БЕТОН  
В МЯГКОМ СОСТОЯНИИ  
ОБЫЧНО НАЗЫВАЮТ  
БЕТОННОЙ СМЕСЬЮ,  
ИЛИ СВЕЖИМ БЕТОНОМ.

СВОЕГО РОДА  
СВЕЖЕБЕТОН.

ШМЯК

ШМЯК

ПОХОЖЕ,  
ЧТО КОШКАМ УДАЁТСЯ  
ИНОГДА ОСТАВЛЯТЬ  
СВОИ СЛЕДЫ...

ХЕ-ХЕ, И ПРАВДА.

БЕТОН В ОПАЛУБКЕ  
УЛУЧШАЕТ СВОИ КАЧЕСТВА  
С ТЕЧЕНИЕМ ВРЕМЕНИ.

ТО ЕСТЬ,  
СТАНОВЯСЬ ТВЁРЖЕ,  
БЕТОН ПОВЫШАЕТ  
СВОЮ ПРОЧНОСТЬ.

СО ВРЕМЕНЕМ  
ЗАТВЕРДЕВШИЙ БЕТОН СТАНОВИТСЯ  
ХРУПКИМ И НЕ ПРИГОДНЫМ  
ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИЗ-ЗА ПОТЕРИ  
СВОИХ СВОЙСТВ ВСЛЕДСТВИЕ  
ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ.

ХРУСЬ!

ЭТО ЖИВОЙ МАТЕРИАЛ,  
КОТОРЫЙ МЕНЯЕТ  
СВОИ СВОЙСТВА  
С ТЕЧЕНИЕМ ВРЕМЕНИ.

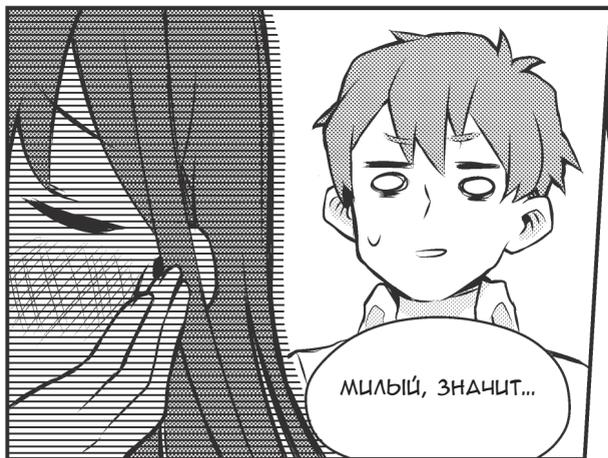


ЕСЛИ ЗА БЕТОНОМ  
ТЩАТЕЛЬНО УХАЖИВАТЬ,  
ТО ОН БУДЕТ ХОРОШО  
"РАСТИ", УЛУЧШАЯ СВОИ  
СВОЙСТВА.

НО ЕСЛИ ЕМУ  
НЕ ОБЕСПЕЧИТЬ  
ПРАВИЛЬНЫЙ УХОД,  
ЕГО КАЧЕСТВА БУДУТ  
НЕИЗБЕЖНО  
УХУДАШАТЬСЯ.



ОН ТАКОЙ МИЛЫЙ.



МИЛЫЙ, ЗНАЧИТ...



НЕОБХОДИМОСТЬ В КОНТРОЛЕ  
НАД ИЗМЕНЕНИЯМИ СВОЙСТВ  
С ТЕЧЕНИЕМ ВРЕМЕНИ ЯВЛЯЕТСЯ  
ОСОБЕННОСТЬЮ БЕТОНА,  
ОТЛИЧАЮЩЕЙ ЕГО ОТ ДРУГИХ  
СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ.



СООТНОШЕНИЕ ВОДЫ, ЦЕМЕНТА, ЩЕБНЯ И ПЕСКА, ЯВЛЯЮЩИХСЯ КОМПОНЕНТАМИ БЕТОНА, В ГРАЖДАНСКОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ НАЗЫВАЮТ **КОМБИНИРОВАНИЕМ**, А В АРХИТЕКТУРЕ - **КОМПАУНДИРОВАНИЕМ**.

Комбини-  
рование

Компаунди-  
рование



ЗНАЧИТ, В СФЕРАХ ГРАЖДАНСКОГО СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ ИСПОЛЬЗУЮТСЯ РАЗНЫЕ ТЕРМИНЫ.



ИМЕННО.



УСТОЙЧИВОСТЬ К ТЕКУЧЕСТИ И РАСЩЕПЛЕНИЮ КОМПОНЕНТОВ ПРИ БЕТОНИРОВАНИИ...

...А ТАКЖЕ ПРОЦЕСС УТВЕРЖДЕНИЯ СООТНОШЕНИЯ ПРОПОРЦИЙ ВОДЫ, ЦЕМЕНТА, ПЕСКА И ЩЕБНЯ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ БЕТОНА, ИМЕЮЩЕГО ТРЕБУЕМЫЕ ДЛЯ СТРОЙМАТЕРИАЛОВ ВЫНОСЛИВОСТЬ И ПРОЧНОСТЬ, НАЗЫВАЮТ **ПРОЕКТИРОВАНИЕМ КОМБИНИРОВАНИЯ (КОМПАУНДИРОВАНИЯ)**.

Проектирование комбинирования [компаундирования]

ЗНАЧИТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОМБИНИРОВАНИЯ (КОМПАУНДИРОВАНИЯ)...

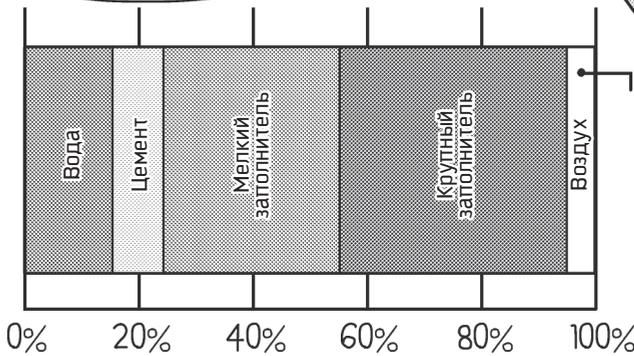
ПЕРИОД  
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
БЕТОНА ОБЫЧНО  
ОЧЕНЬ ДЛИТЕЛЕН.

НО НЕОБХОДИМО ТЩАТЕЛЬНО  
ПОДБИРАТЬ КОМПОНЕНТЫ  
И ПРОПОРЦИИ, В КОТОРЫХ  
ИХ СМЕШИВАТЬ, ЧТОБЫ ТОЧНО  
ОПРЕДЕЛИТЬ, КАК МЕНЯЮТСЯ  
СВОЙСТВА БЕТОНА ВО ВРЕМЯ  
ЕГО ЭКСПЛУАТАЦИИ.



ИМЕЕТСЯ В ВИДУ,  
ЧТО НЕЛЬЗЯ СМЕШИВАТЬ  
НЕУТВЕРЖДЕННЫЕ  
КОМПОНЕНТЫ АБЫ КАК...

ХОТЯ НА ПЕРВЫЙ ВЗГЛЯД  
МОЖЕТ ПОКАЗАТЬСЯ, ЧТО ВСЕ  
ВИДЫ БЕТОНА ВЫГЛЯДЯТ  
ОДИНАКОВО, НА ДЕЛЕ ЖЕ ОНИ  
ВСЕ ИМЕЮТ РАЗНЫЕ СВОЙСТВА  
И КАЧЕСТВА В ЗАВИСИМОСТИ  
ОТ ПРЕДНАЗНАЧЕНИЯ.



ЕСЛИ ИЗОБРАЗИТЬ  
ПРОПОРЦИОНАЛЬНОЕ  
СООТНОШЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ  
БЕТОНА В ВИДЕ ПРОЦЕНТОВ ОТ  
ОБЩЕГО ОБЪЕМА, ТО ОНО  
БУДЕТ ВЫГЛЯДЕТЬ ВОТ ТАК.



КАК ВИДНО,  
ПЕСОК СО ШЕБЕНЕМ, ЯВЛЯЮЩИЕСЯ  
ОСНОВОЙ ДЛЯ ЗАПОЛНИТЕЛЯ БЕТОНА,  
СОСТАВЛЯЮТ ПОЧТИ 80 ПРОЦЕНТОВ  
ОТ ОБЩЕГО ОБЪЕМА...



ЭТО ПОТОМУ,  
ЧТО ЗАПОЛНИТЕЛЬ  
ОБЕСПЕЧИВАЕТ ПРОЧНОСТЬ  
И УСТОЙЧИВОСТЬ,  
ПО ИСТИНЕ ЯВЛЯЯСЯ  
"КОСТЯКОМ" БЕТОНА.



ЦЕМЕНТНОЕ ТЕСТО, ПОЛУЧЕННОЕ  
ПУТЁМ СМЕШИВАНИЯ ВОДЫ  
С ЦЕМЕНТОМ, ВЫПОЛНЯЕТ  
ФУНКЦИЮ КЛЕЯ, СОЕДИНЯЮЩЕГО  
ЭТОТ "КОСТЯК".



Тесто

ЦЕМЕНТНОЕ ТЕСТО  
ИМЕЕТ В СОСТАВЕ ВОДУ  
И ЯВЛЯЕТСЯ СИЛЬНОЙ  
ЩЕЛОЧЬЮ С PH,  
РАВНЫМ 12-14.

ОНО РЕАГИРУЕТ  
НА ИЗМЕНЕНИЕ  
ВЛАЖНОСТИ  
И ТЕМПЕРАТУРЫ  
ОКРУЖАЮЩЕЙ  
СРЕДЫ.

ВЖИК-  
ВЖИК



*Совсем ушла  
в тему*

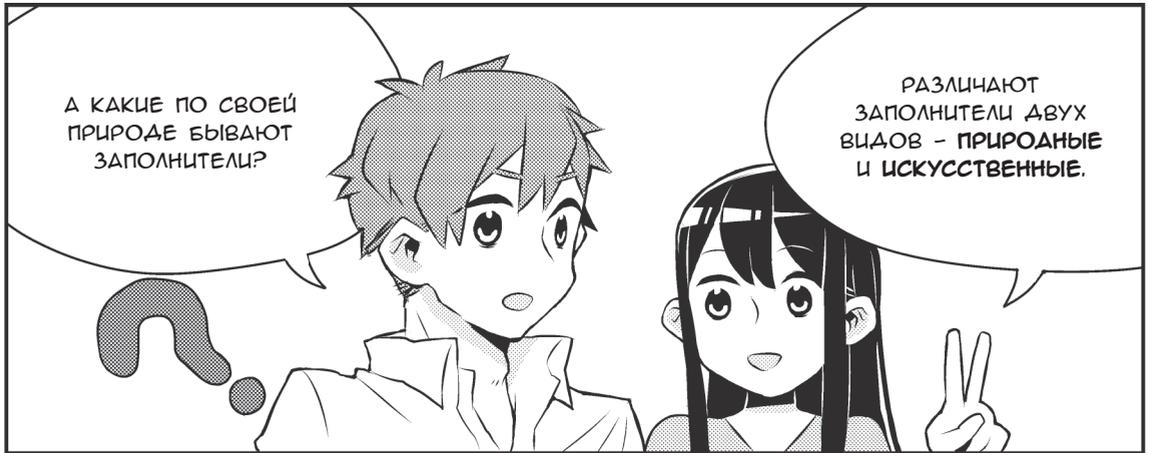


ПРОЧНОСТЬ  
И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ  
ЦЕМЕНТНОГО ТЕСТА МОЖНО  
РЕГУЛИРОВАТЬ, ИЗМЕНЯЯ  
СООТНОШЕНИЕ ВОДЫ И ЦЕМЕНТА.



## 1.2. О ЗАПОЛНИТЕЛЯХ БЕТОНА

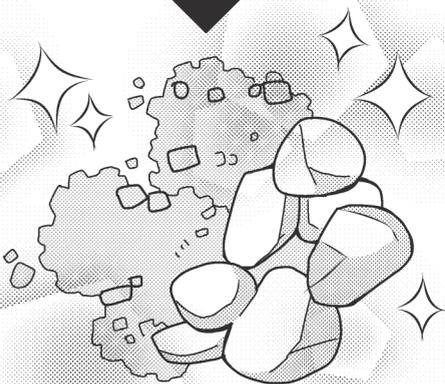




ЕЩЁ ПРЕДПРИНИМАЮТСЯ  
ПОПЫТКИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
ВТОРИЧНЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ,  
КОТОРЫЕ ПОЛУЧАЮТ  
В РЕЗУЛЬТАТЕ ПЕРЕРАБОТКИ  
ОТСЛУЖИВШЕГО СВОЙ СРОК  
БЕТОНА.



Из переломанного бетона...



...извлекают заполнитель!!

НАСТАЛА  
ЭПОХА ЭКОНОМИИ  
И ДЛЯ ЗАПОЛНИТЕЛЯ...



В ЗАВИСИМОСТИ  
ОТ ВИДА ЗАПОЛНИТЕЛЯ  
ТАКИЕ ФИЗИЧЕСКИЕ  
СВОЙСТВА, КАК ФОРМА  
И ПРОЧНОСТЬ...

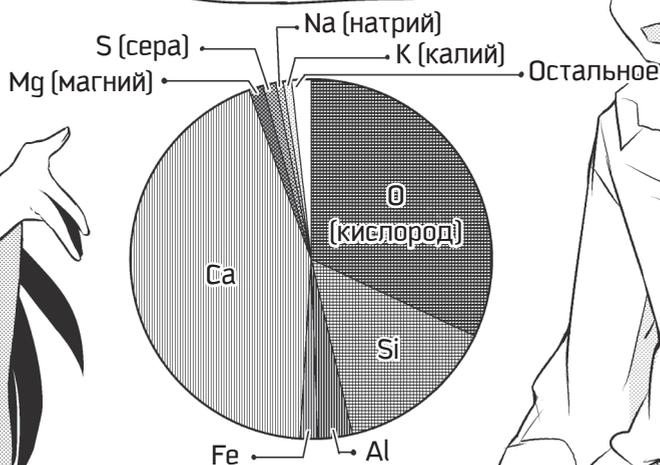
...ВКЛЮЧАЯ  
ХИМИЧЕСКУЮ ИНЕРТНОСТЬ  
ПО ОТНОШЕНИЮ К КИСЛОТАМ  
И ЩЕЛОЧАМ, МЕНЯЮТСЯ, ПОЭТОМУ  
НЕОБХОДИМО ТЩАТЕЛЬНО  
ПРОДУМЫВАТЬ ВОЗМОЖНЫЕ  
ВОЗДЕЙСТВИЯ СОСТАВА  
ЗАПОЛНИТЕЛЯ НА ГОТОВЫЙ  
БЕТОН.

### 1.3. О ЦЕМЕНТЕ



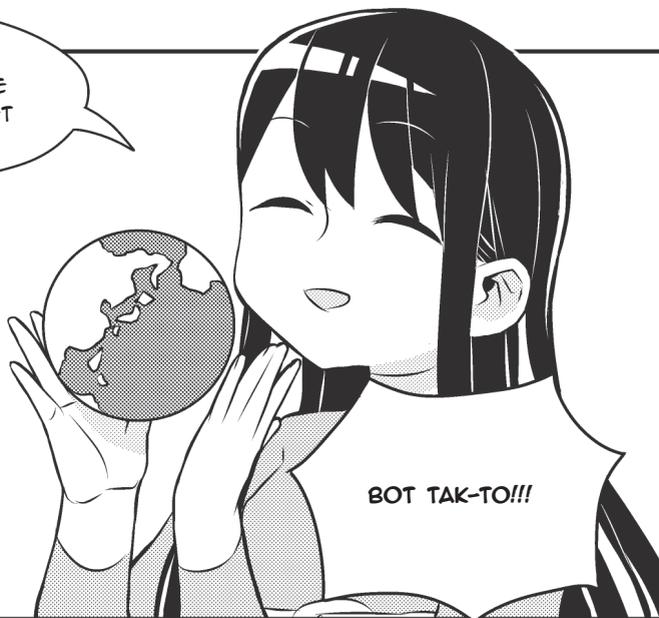
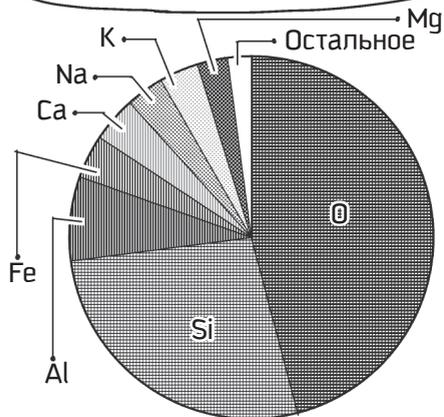
ПРАВИЛЬНО ЦЕМЕНТ,  
ПРИМЕНЯЕМЫЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ,  
НАЗЫВАЮТ **ПОРТЛАНЦЕМЕНТОМ**.  
ОСНОВНЫМИ СОСТАВЛЯЮЩИМИ ЕГО  
ЭЛЕМЕНТАМИ ЯВЛЯЮТСЯ Кальций (Ca),  
Кремний (Si), Алюминий (Al)  
И ЖЕЛЕЗО (Fe).

ЭТИ ЭЛЕМЕНТЫ ВАМ НИЧЕГО  
НЕ НАПОМИНАЮТ?



А? НУ ВОООЩЕ...

ЗА ИСКЛЮЧЕНИЕМ КАЛЬЦИЯ,  
ПРОПОРЦИОНАЛЬНОЕ СООТНОШЕНИЕ  
ОСТАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НАПОМИНАЕТ  
СОСТАВ ЯДРА ЗЕМЛИ.

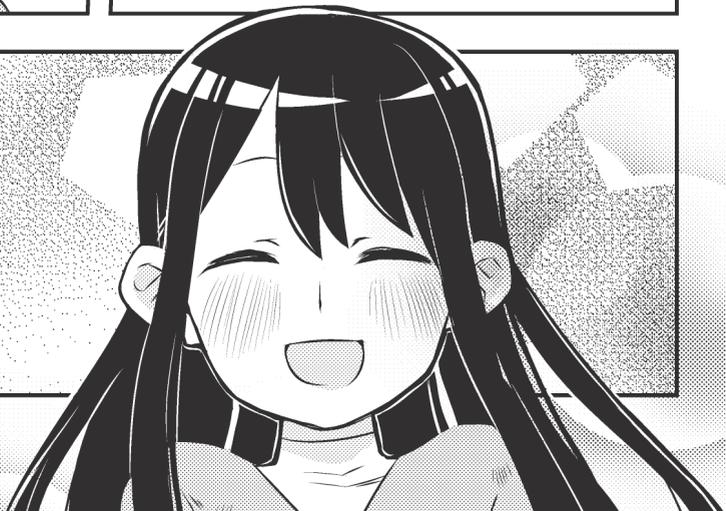


ДРУГИМИ СЛОВАМИ, ЦЕМЕНТ СОСТОИТ  
ИЗ ЭЛЕМЕНТОВ, РАВНОМЕРНО РАСПРЕДЕЛЁННЫХ  
ПО ВСЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ. В ОТЛИЧИЕ  
ОТ ДРУГИХ ПРИРОДНЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ,  
ТАКИХ КАК НЕФТЬ, РЕДКИЕ МЕТАЛЛЫ  
И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ, ЕГО  
"МЕСТОРОЖДЕНИЯ" НЕ ПРИВЯЗАНЫ  
К ОПРЕДЕЛЕННЫМ РЕГИОНАМ.



ПОЭТОМУ ЦЕМЕНТ  
ПРОИЗВОДИТСЯ ГДЕ УГОДНО  
И В БОЛЬШИХ КОЛИЧЕСТВАХ  
И ПОВСЕМЕСТНО ИСПОЛЬЗУЕТСЯ  
В КАЧЕСТВЕ СТРОИТЕЛЬНОГО МАТЕРИАЛА  
ДЛЯ ОБЪЕКТОВ ИНФРАСТРУКТУРЫ  
И АРХИТЕКТУРНЫХ СООРУЖЕНИЙ.

ИМЕННО ТАК!!



А КАК ЭТОТ ЦЕМЕНТ  
ИЗГОТАВЛИВАЮТ?



Измельчение в порошок  
и обжигание

Сырьё

Известняк  
Кремнезём  
Глина

Клинкер

Охлаждение

Гипс

Пulверизация

Цемент

СЫРЬЕВУЮ  
СМЕСЬ ИЗ ИЗВЕСТНЯКА,  
КРЕМНЕЗЁМА И ГЛИНЫ  
ИЗМЕЛЧАЮТ В ПОРОШОК,  
КОТОРЫЙ ОТПРАВЛЯЮТ  
В РАСКАЛЁННУЮ ДО 1450 °С  
ПЕЧЬ И ОБЖИГАЮТ  
ДО ПОЛУЧЕНИЯ ПРОДУКТА  
ОБЖИГА, НАЗЫВАЮЩЕГОСЯ  
КЛИНКЕРОМ.

СКАТАННЫЙ  
В КОЛОБКИ КЛИНКЕР  
ОТПРАВЛЯЮТ В ОХЛАДИ-  
ТЕЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО  
И РЕЗКО ОХЛАЖДАЮТ,  
ВПОСЛЕДСТВИИ СМЕШИВАЮТ  
С ГИПСОМ И В ПРОЦЕССЕ  
ПУЛЬВЕРИЗАЦИИ  
ПОЛУЧАЮТ ЦЕМЕНТ.

ОГО-О!

МЕЖДУ ПРОЧИМ,  
В КАЧЕСТВЕ СЫРЬЯ ДЛЯ ЦЕМЕНТА  
ТАКЖЕ ИСПОЛЬЗУЮТ ЛЕТУЧУЮ ЗОЛУ,  
ОБРАЗУЮЩУЮСЯ НА ТЭЦ,  
И ДОМЕННЫЙ ШЛАК, ЯВЛЯЮЩИЙСЯ ОТХОДОМ  
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ,  
ЧТО СПОСОБСТВУЕТ УТИЛИЗАЦИИ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ.

ХММ...



БОЛЕЕ ТОГО, ЕЩЁ ЕСТЬ ТАК  
НАЗЫВАЕМЫЙ ЭКОЦЕМЕНТ,  
ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОТОРОГО  
В КАЧЕСТВЕ СЫРЬЯ  
ИСПОЛЬЗУЮТ ЗОЛУ  
ОТ СОЖЖЁННОГО  
ГОРОДСКОГО МУСОРА.

БЛАГОДАРЯ РАЗЛИЧНЫМ  
ТЕХНОЛОГИЯМ ПОДОБНЫЙ  
ЦЕМЕНТ НЕ УСТУПАЕТ ПО  
СВОЙСТВАМ ОРИГИНАЛЬНОМУ  
ПРОДУКТУ ИЗ ПЕРВИЧНОГО  
СЫРЬЯ.



ЭТО ОДНО  
ИЗ ПОСЛЕДНИХ  
ДОСТИЖЕНИЙ ЯПОНСКИХ  
НОВЕЙШИХ ТЕХНОЛОГИЙ  
В ПРОМЫШЛЕННОСТИ!

ОГО!  
ВОТ ЭТО ДА!

#### 1.4. БЕТОН ВОКРУГ НАС



БЕТОН ЯВЛЯЕТСЯ  
НЕЗАМЕНЫМЫМ МАТЕРИАЛОМ  
ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ МНОГИХ  
СООРУЖЕНИЙ ГРАЖДАНСКОГО  
СТРОИТЕЛЬСТВА...

...ТАКИХ КАК МОСТЫ,  
ТУННЕЛИ, ДАМБЫ,  
ПЛОТИНЫ, ЖИЛЬЕ ДОМА,  
НЕБОСКРЁБЫ.



И ПРАВДА,

БЕЗ БЕТОНА НАША ЖИЗНЬ,  
ПОЖАЛУЙ, НЕВОЗМОЖНА...



В АДЕЙСТВЕЛЬНОСТИ  
БЕТОН ЯВЛЯЕТСЯ ВТОРЫМ  
РЕСУРСОМ ПОСЛЕ ВОДЫ  
ПО СТЕПЕНИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
ВО ВСЁМ МИРЕ.

И ПРИЧИНАМИ СТОЛЬ  
ИНТЕНСИВНОГО ПРИМЕНЕНИЯ  
ЯВЛЯЕТСЯ ОБЩАЯ  
ДОСТУПНОСТЬ СЫРЬЯ,

СИСТЕМА ПЕРЕРАБОТКИ  
ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ

И ВАОЕБАВОК  
НИЗКАЯ СЕБЕСТОИМОСТЬ -  
МЕНЬШЕ 6 РУБЛЕЙ ЗА ЛИТР.  
ВСЕ ЭТО ОБЪЯСНЯЕТ  
ПРЕИМУЩЕСТВА БЕТОНА ПЕРЕД  
ДРУГИМИ МАТЕРИАЛАМИ.



КОРОЧЕ,  
БЕТОН -  
ИДЕАЛЬНЫЙ  
КАНДИДАТ  
В КАЧЕСТВЕ  
СТРОЙ-  
МАТЕРИАЛА.

ОДНАКО СВОЙСТВА  
И КАЧЕСТВО  
ГОТОВОГО БЕТОНА  
СИЛЬНО МЕНЯЮТСЯ  
В ЗАВИСИМОСТИ  
ОТ УСЛОВИЙ  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
И СТРОИТЕЛЬСТВА.

ЭТО ПОТОМУ, ЧТО ХОТЬ ВОДА, ЦЕМЕНТ,  
ПЕСОК И ЩЕБЕНЬ ПО ОТДЕЛЬНОСТИ  
ЯВЛЯЮТСЯ ПРОСТЫМИ МАТЕРИАЛАМИ,  
ИХ РАЗЛИЧНОЕ КОМБИНИРОВАНИЕ,  
СПОСОБЫ ИХ СМЕШИВАНИЯ И МЕТОДЫ,  
ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ,  
СИЛЬНО ВЛИЯЮТ НА ИТОГОВОЕ  
КАЧЕСТВО.



К ТОМУ ЖЕ  
ВИЗУАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ  
ПРИГОДНОСТИ БЕТОНА  
ДОВОЛЬНО  
ЗАТРУДАНИТЕЛЬНО.



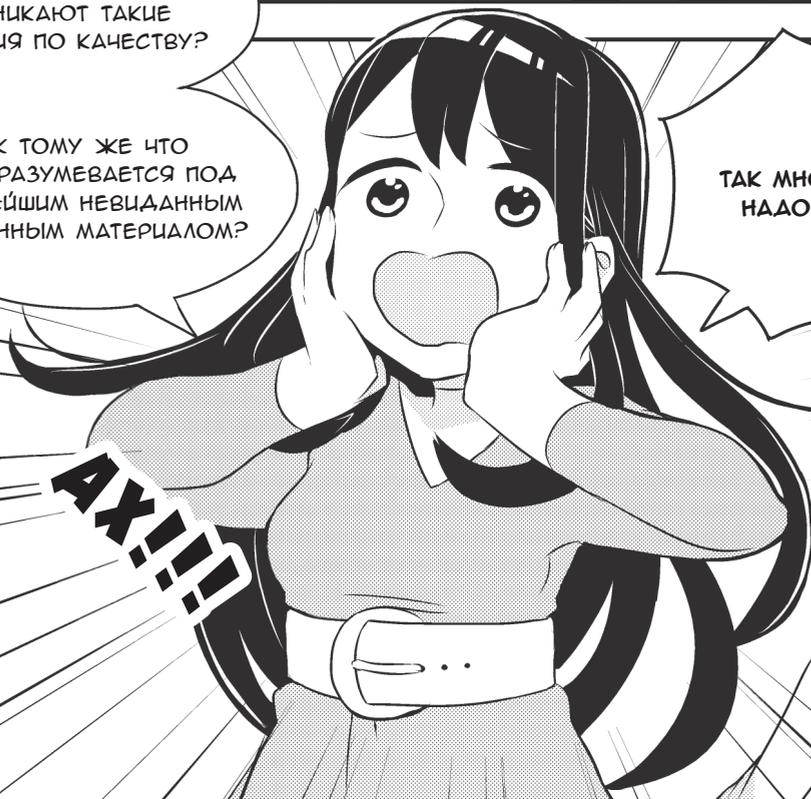
НУ ДА...

ДА И ВООБЩЕ,  
ПОЧЕМУ В ПРИНЦИПЕ  
ВОЗНИКАЮТ ТАКИЕ  
РАЗЛИЧИЯ ПО КАЧЕСТВУ?



КАК ЖЕ СДЕЛАТЬ БЕТОН,  
КОТОРЫЙ БУДЕТ КРАСИВЫМ,  
ПРОЧНЫМ И ПРИ ЭТОМ БУДЕТ  
ЕЩЕ И ДОЛГО СЛУЖИТЬ?

К ТОМУ ЖЕ ЧТО  
ПОДРАЗУМЕВАЕТСЯ ПОД  
НОВЕЙШИМ НЕВИДАННЫМ  
БЕТОННЫМ МАТЕРИАЛОМ?



ТАК МНОГО ВЕЩЕЙ ЕЩЕ  
НАДО РАССКАЗАТЬ!!

**АХ!!**





ХА-ХА, ТОГДА  
НЕ РАССКАЖЕТЕ ЛИ  
МНЕ ОБ ЭТОМ  
КАК-НИБУДЬ  
В ДРУГОЙ РАЗ?

Ой!

ПРОСТИТЕ, СОВСЕМ  
УВЛЕКЛАСЬ И ЗАТЯНУЛА  
НАШ РАЗГОВОР...

НЕТ-НЕТ, БЫЛО  
ОЧЕНЬ ВЕСЕЛО!

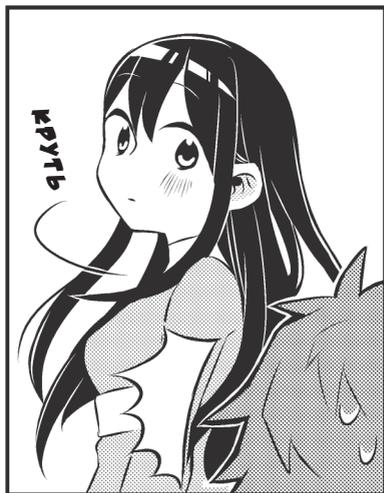


ДАВАЙТЕ ВЕРНЁМСЯ  
НА СТАНЦИЮ, ПОСМОТРИМ  
НА МОСТ ХИДЗИРИБАСИ  
С ПЛАТФОРМЫ И ПОТОМ  
УЖЕ ПОЕДЕМ ДОМОЙ!

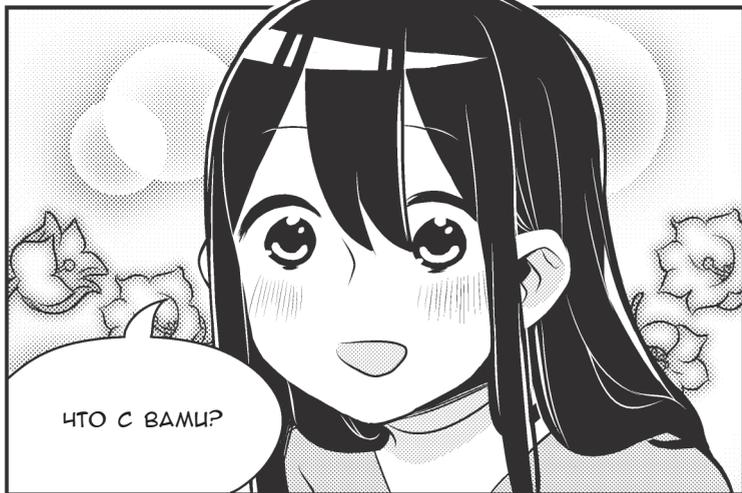
ДА-А...  
ХОРОШО.



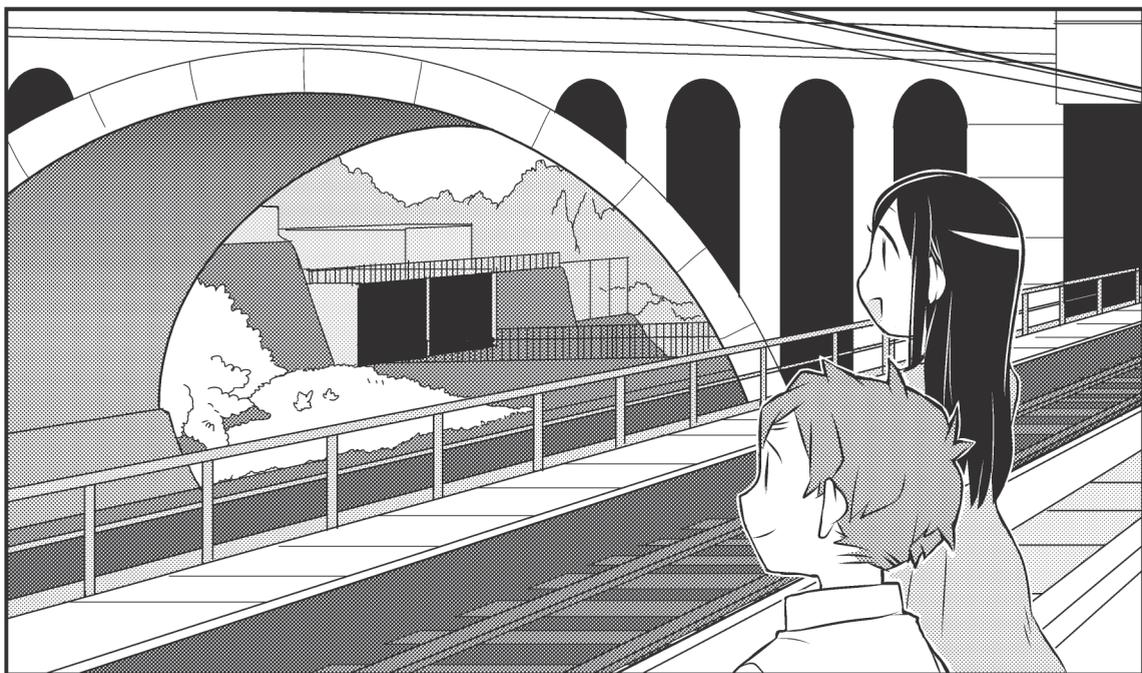
РАЗ УЖ ТАКОЕ ДЕЛО,  
ХОТЕЛОСЬ БЫ ЗАЙТИ  
КУДА-НИБУДЬ ВМЕСТЕ  
ВЫПИТЬ ЧАЮ...



КРУТЬ



ЧТО С ВАМИ?





## ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

### Что такое бетон

Бетон является самым востребованным в мире стройматериалом, изготавливаемым путём смешивания воды, цемента, мелкого заполнителя (песка) и крупного заполнителя (щебня). Существуют следующие разновидности бетона: бетон, изготовленный непосредственно на месте строительных работ, и свежий бетон с завода по производству бетонной смеси. Готовый продукт либо поставляется на места строительства, либо утилизируется в качестве сырья для переработанного бетона на заводах по производству материалов вторичной обработки.

Устройство для изготовления бетона вблизи строительных площадок называют пневмонагнетателем (пневматическим бетононасосом). Этот агрегат состоит из резервуара для хранения цементного сырья, дозатора для отмеривания количества сырья и бетоносмесителя для смешивания. Пневмонагнетатель устанавливается, когда требуется большое количество бетона для строительства бетонных плотин и снижения финансовых затрат на транспортные перевозки.

На первых порах применения бетона в строительстве его производство в основном осуществлялось на месте строительных работ. Однако благодаря изобретению автобетономешалки стала возможной транспортировка бетона постоянного состава и качества, в связи с чем в Японии с 1955 года начало распространяться использование свежего бетона (бетонной смеси). Производство свежего бетона, коммерческое название которого – бетонная смесь, сильно увеличилось после Второй мировой войны в связи с ростом потребности в нём в период экономического роста в стране. Благодаря удобству транспортировки свежего бетона, быстро доставляемого «по телефонному звонку», отпала необходимость в установке агрегатов для изготовления бетона на самих стройплощадках, в связи с чем свежий бетон широко применяется и в наши дни. Так, общий объём поставок бетона в 2009 году составлял почти 86 млн м<sup>3</sup>. Однако, сравнивая эти цифры с рекордом 1990 года, когда общий объём бетонного груза составил почти 198 млн м<sup>3</sup>, нельзя не заметить, что количество изготавливаемого бетона с тех пор снизилось более чем в половину.

Изделия из бетона, изготавливаемые на специальных заводах ЖБИ, называют сборными железобетонными конструкциями. К сборным железобетонным конструкциям относятся: сегменты туннелей, применяемых при строительстве туннелей щитовым способом (см. главу 3), сборные перекрытия (см. главу 6), водопропускные трубы, несущие стены и даже электрические столбы. Производство сборного железобетона непосредственно на заводе значительно упрощает контроль над процессом строительства и позволяет стабилизировать качество продукта.

## Бетон, идущий в ногу со временем

Мягкая консистенция свежеприготовленного бетона позволяет создавать объекты различной формы путём заливания бетона в предназначенные для этого опалубки. Еще не застывший бетон в мягком состоянии называют свежим бетоном. Пройдёт несколько часов после заливки бетона, прежде чем цемент начнёт постепенно взаимодействовать с водой в ходе химической реакции гидратации, что приводит к его застыванию. Процесс заливания бетона в опалубки называется **бетонированием**, или **укладкой бетона**. При этом одновременно повышаются прочность и плотность бетона благодаря изменению структуры цемента, происходящему в ходе химической реакции. В случае с обычным бетоном реакция гидратации осуществляется на 70–80 % в течение четырёх недель. Подобно тому, как образ жизни в подростковый период сильно влияет на дальнейший рост человека, процесс затвердевания в первый месяц после бетонирования определяет свойства бетона. Качество обеспечения правильного ухода за бетоном решает, длительным будет срок его службы или нет. Поэтому важно не только уметь правильно смешивать сырьё, но и после тщательно следить за дальнейшим формированием конечного продукта. Время влияет на изменения свойств бетона, позволяя мягкой бетонной смеси превращаться в материал, создающий прочный каркас, который можно использовать на протяжении долгого времени (рис. 1.1). Как можно заметить, бетон, идущий в ногу со временем, обладает многими качествами, не свойственными другим промышленным материалам.

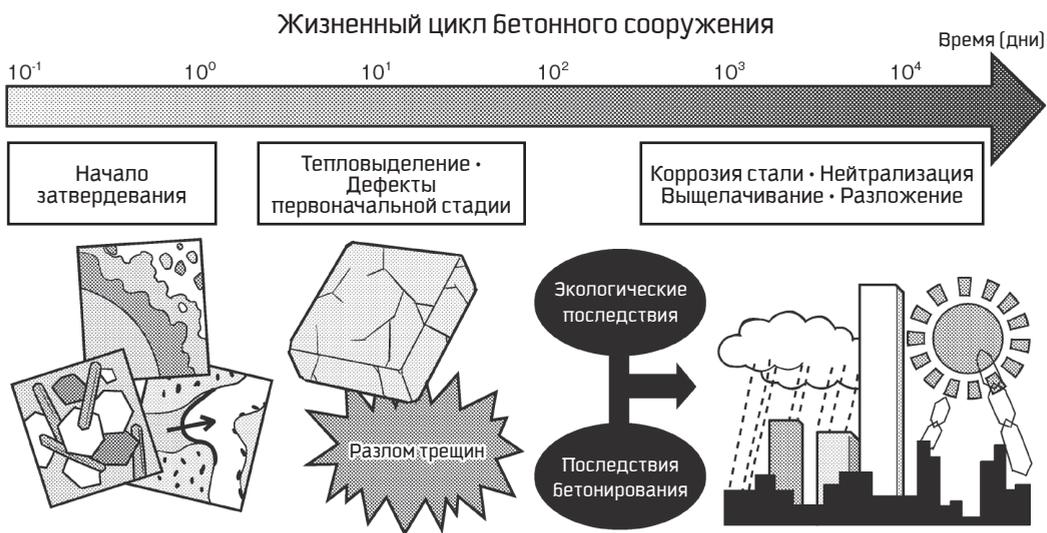


Рис. 1.1. Бетон как «живой» материал

## Подбор состава бетона

Свойства бетона определяются соотношением пропорций воды, цемента, песка, щебня и воздуха. Это соотношение в гражданском строительстве называют **комбинированием**, а в области архитектуры – **компаундированием**, а процесс подбора необходимых пропорций называется **проектированием комбинирования (компаундирования)**. При подборе состава бетона следует учитывать желаемые свойства как свежей бетонной массы, так и затвердевшего бетона. При этом требуемые свойства итогового материала нужно продумывать в рамках проектирования не по отдельности, а соотносить как вместе взятые. Порой условия проектирования поставлены таким образом, что необходимо одновременно совмещать свойства бетона, в сущности противоречащие друг другу. Подобная ситуация даёт шанс проектировщику по бетону показать своё мастерство на высшем уровне. В таких случаях при подборе состава бетона следует учитывать не только текучесть и химическую стабильность сырья, но и прочность, необходимую для построения фундамента, и устойчивость к воздействиям окружающей среды готового продукта.

Состав бетона выражают в виде массового расхода материалов (кг), необходимых для приготовления 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси (табл. 1.1). Учитывая особое влияние количества воды и цемента на цену и качество бетона, отдельно указывается расход воды, который выражается водоцементным соотношением, где масса цемента принимается за 1. Эти характеристики бетона будет полезно запомнить, так как они часто используются в бетонном деле.

**Таблица 1.1. Пример подобранного состава бетона**

Водоцементное соотношение (% от массы)	Содержание воздуха (%)	Количество (кг/м <sup>3</sup> )			
		Вода	Цемент	Мелкий заполнитель	Крупный заполнитель
52,1	4,0	150	288	832	1040

Смесь цемента с водой называется цементным тестом, смесь цементного теста с песком – строительным раствором, а сам бетон представляет из себя смесь строительного раствора со щебнем. Указанное в табл. 1.1 водоцементное соотношение используется при изготовлении строительного раствора и является наиболее важной характеристикой, от которой напрямую зависит прочность и долговечность бетона. Чем ниже содержание воды в цементе, тем выше концентрация цемента в строительном растворе, что одновременно повышает прочность и долговечность материала. Содержание воздуха в бетоне выражается в процентах от общего объёма бетона. В данном случае под воздухом подразумеваются воздушные пузырьки с диаметром от нескольких десятков до 200 мкм. Добавление в бетон примеси – пластификатора АЕ – влияет на величину пор в бетоне. Пластифицирующие добавки увеличивают порог замерза-

ния воды в бетонном растворе, повышая тем самым морозостойкость бетона. Однако чрезмерное количество воздуха в бетоне может привести к снижению прочности. Обычно рекомендуется вовлекать воздух объемом от 4 до 7 % от общего объема бетона.

## Преимущества и недостатки бетона

Теперь попробуем разобрать особенности свойств бетона. В качестве преимуществ можно назвать следующие пункты:

- низкая цена;
- возможность изготовления из него различных форм;
- долговечность и огнестойкость.

В то же время нельзя не учитывать следующие недостатки:

- тяжелый вес;
- сложность утилизации;
- высокое сопротивление сжатию, но слабая устойчивость к растяжению;
- невозможность полного устранения глубоких трещин;
- сильная зависимость качеств сооружений (в особенности долговечности) от качества конструкции.

Бетон является одним из примеров того, как недостатки при определенных условиях могут превращаться в достоинства, и наоборот – преимущества могут становиться несовершенствами. Взять, к примеру, тяжёлый вес, рассматриваемый как недостаток бетона. В случае сооружения плотин тяжёлый вес бетона способствует сопротивлению давлению воды, превращаясь из недостатка в преимущество. В случае с архитектурными постройками и опорными структурами мостов для бюджетного строительства желательно использовать более лёгкий по весу материал с той же прочностью, что и у тяжёлой модификации. Однако тяжёлый материал более предпочтителен для громоздких устойчивых конструкций, таких как вышеупомянутые плотины. Несмотря на то что плотность (удельный вес) бетона меняется в зависимости от комбинирования и плотности сырьевых материалов, 1 м<sup>3</sup> бетона в среднем весит около 23 т. В составе бетона решающую роль в изменении веса играет плотность заполнителя (песок и щебень), имеющего наиболее высокий процент содержания по объёму. В связи с этим при изготовлении бетона с пониженным весом используют лёгкие пористые заполнители.

## Механические свойства бетона

Наиболее широко используется бетон с прочностью на сжатие от 20 до 40 МПа. В последние годы начали чаще использовать бетон с более высоким показателем прочности в 200 МПа. 200 МПа означает, что 1 м<sup>3</sup> бетона может выдерживать груз весом до 2 т. Бетон такой исключительной прочности используется при строительстве железобетонных многоэтажных зданий. В настоящее время

идет активная разработка и внедрение бетона особо повышенной прочности из-за увеличения нагрузки на сравнительно небольшое основание при строительстве небоскрёбов. Использование обычных материалов приводит к усилению прочности колонн при сжатии за счёт увеличения их толщины и, следовательно, уменьшению жилого пространства между колоннами. Однако следует заметить, что у модифицированного бетона достаточно низкая прочность на растяжение, по сравнению с его стойкостью к сжатию, что приводит к разрушению бетона лишь от одной десятой доли прилагаемой силы. Поэтому в результате соединения стойкого к сжатию бетона с прочной на растяжение арматурой появился железобетон (Reinforced Concrete, сокращенно RC), сочетающий качества обеих составляющих.

Существует много версий на тему того, кто изобрёл железобетон, но согласно наиболее признанному варианту первое изделие из железобетона было изготовлено одним французским садоводом, который сделал цветочный горшок, обмотав ступку изнутри железной проволокой. К тому же о существовании пропорциональной взаимосвязи между стойкостью к сжатию бетона и обратным водоцементным соотношением (содержанием цемента по отношению к общему количеству воды в бетоне) было известно с незапамятных времен. Так, американский профессор Д. А. Абрамс обнаружил связь между прочностью бетона и содержанием цемента по отношению к содержанию воды в бетоне ещё в 1920-е годы, о чем и написал в своей диссертации, опубликовав её в журнале американского сообщества технологов по бетону<sup>1</sup>. В последние годы вносятся предложения по внедрению моделей, с высокой точностью предсказывающих прочность бетона с учётом сложных процессов реакций гидратации цемента и микроструктуры бетона.

## Составные части бетона

Теперь давайте слегка изменим трактовку табл. 1.1 и рассмотрим сырьевые материалы с точки зрения процентного соотношения по объёму. Для упрощения допустим, что плотность воды – 1,0 г/см<sup>3</sup>, плотность цемента – 3,2 г/см<sup>3</sup>, а плотность мелкого и крупного заполнителей – 2,6 г/см<sup>3</sup>. Поскольку объём можно вычислить, поделив массу на плотность, состав бетона можно выразить через объёмное соотношение, как показано в табл. 1.2.

**Таблица 1.2. Состав бетона в объёмных долях**

Содержание воды в цементе (объем)	Содержание воздуха (%)	Количество (л/м <sup>3</sup> )			
		Вода	Цемент	Мелкий заполнитель	Крупный заполнитель
167	4,0	150	9	320	400

<sup>1</sup> Abrams D. A. Proportioning Concrete Mixtures // ACI Journal. 1922. V. 18 (2). P. 174–181.

Как показано в табл. 1.2, мелкий и крупный заполнители с плотностью в 720 л на 1 м<sup>3</sup> в совокупности составляют 72 % от общего объёма. Несмотря на то что количество заполнителя в составе немного изменяется в зависимости от разновидности бетона, заполнитель в большинстве случаев составляет около 70–80 % от общего объёма обычного бетона. При изготовлении самоуплотняющегося бетона, которому посвящена глава 3, используется меньшее количество заполнителя, по сравнению с обычным бетоном, во избежание слипания частичек заполнителя. Однако в случаях, когда требуется уменьшить теплоту гидратации и степень усадки бетона при высыхании, количество заполнителя предпочтительно увеличивать, понижая содержание цемента. Какое же требуется количество заполнителя для увеличения его содержания? Попробуем немного разобраться.

Чтобы в этом разобраться, необходимо знать, что такое **абсолютный объём**. Абсолютным объёмом называют максимальный объём, который может занимать материал (песок, заполнитель, цемент или вода) в отведённом ему пространстве, если предположить, что бетонная смесь не содержит пустот. Показатели абсолютного объёма меняются в зависимости от размера частиц и их геометрических характеристик. Теперь рассмотрим смесь, состоящую из больших частиц крупного заполнителя и маленьких песчинок мелкого заполнителя. Для упрощения обозначим показатели абсолютного объёма каждого из заполнителей как 60 % от общего объёма смеси. Сначала пространство контейнера максимально плотно загружается крупным заполнителем (рис. 1.2). В таком состоянии объём пустого пространства (пористость) по определению составляет  $1,0 - G_{lim}$ . Если абсолютный объём крупного заполнителя составляет 60 % от общего объёма, пористость приравнивается к 40 % от общего объёма. Далее уплотняем мелким заполнителем пустое пространство контейнера, уже на пределе загрузки крупным заполнителем. Пространство, которое можно закрыть мелким заполнителем, приравнивается к  $(1,0 - G_{lim})$ , где  $G_{lim}$  – предельная объёмная доля для крупного заполнителя, потому что это и есть пространство, которое остаётся не заполненным крупным заполнителем. Следовательно, объём остающегося пространства для мелкого заполнителя приравнивается к  $(1,0 - G_{lim}) \cdot S_{lim}$ , где  $S_{lim}$  – предельная объёмная доля для мелкого заполнителя. Исходя из вышеизложенных рассуждений, объёмную долю заполнителей для максимального уплотнения контейнера крупным и мелким заполнителями можно вычислить следующим образом:

$$G_{lim} + (1,0 - G_{lim}) \cdot S_{lim} = 0,6 + 0,4 \times 0,6 = 0,84 \text{ (84 \%)}.$$

Как видно, система со смешанным составом из крупного и мелкого заполнителей уплотняется с более эффективным использованием пространства, по сравнению с системой, наполненной лишь одним из двух видов заполнителей. Если в случае использования только одного вида заполнителя объём пространства наполняется лишь на 60 %, уплотнение обоими видами заполнителя по-

звояет увеличить эффективность использования пространства вплоть до 84 %. Значимость данных расчётов заключается в том, что они позволяют правильно подобрать размер гранул заполнителей для эффективного размещения частиц разных размеров по всему пространству, необходимого при изготовлении прочного бетона хорошего качества.



*Рис. 1.2. Максимальное уплотнение пространства крупным и мелким заполнителями*

## О заполнителях бетона

По происхождению заполнители подразделяют на природные и искусственные. Природные заполнители получают из окружающей среды – путём добычи и переработки горных пород магматического или осадочного происхождения, или добывают на равнинах, с речного дна и в устьях рек (речной песок, гравий), с морского дна (морской песок, гравий). В связи с обострением экологических проблем в последнее время всё чаще используется искусственный заполнитель, получаемый из промышленных отходов путём дробления, обжига, поризации расплавов шлаков и т. д. При изготовлении легкого бетона используется облегченный искусственный заполнитель. Этот вид заполнителя получают путём обжигания перлита. Если плотность обычного заполнителя составляет приблизительно 2,6, плотность искусственного облегченного варьируется от 1,3 до 1,7, что позволяет значительно облегчить вес самого бетона.

В данном разделе мы уже коснулись темы классификации заполнителя по размерам песчинок на мелкий (песок с диаметром в 0,5–5 мм) и крупный (щебень с диаметром более 5 мм). Какой же размер гранул оптимален для крупного заполнителя? При заливке бетонных конструкций с маленькой площадью поперечного сечения слишком крупный заполнитель может ухудшить качество бетонирования. В случае с размещением арматуры заполнитель размером, превышающим расстояние между железными брусками, не даст бетону равномерно затвердеть. В связи с этим в инструкции по бетонному строительству от ассоциации японских строительных инженеров указано, что максимальный раз-

мер крупного заполнителя не должен превышать одну пятую минимального размера стройматериала или три четверти расстояния между прутьями арматурного каркаса. Наиболее широко применяется крупный заполнитель с максимальным размером в 25 или 20 мм. Однако для строительства бетонных плотин с большой площадью поперечного сечения используется крупный заполнитель с максимальным размером от 80 до 150 мм. Заполнитель является своего рода «ведущим игроком» в составе бетона, занимая почти 80 % от общего объема. Таким образом, от заполнителя зависят такие свойства бетона, как прочность на сжатие и на изгиб (эластичность), а также водонепроницаемость и устойчивость к изменению формы и действию различных химических веществ. Эти свойства в совокупности определяют качество самого бетона. Требуется уделять особое внимание изменениям в характеристиках готового продукта, которые происходят в результате его усадки при высыхании, и различиям в его стойкости, которые определяются свойствами заполнителя. Нельзя забывать и о роли географического фактора места добычи сырья, также имеющего влияние на изменения качеств заполнителя.

## О портландцементе

Цемент, используемый в качестве сырья для бетона, правильно называется портландцементом. Название «портланд» было дано из-за схожести цвета и твердости затвердевшего цемента с природным камнем, добываемым на острове Портленд в Англии. В 1824 году англичанин по имени Джозеф Аспдин приобрел патент на производство портландцемента. Благодаря разбросанным по всей стране многочисленным залежам горных пород, где хорошо развита добыча высококачественного известняка, Японию можно считать по мировым стандартам достаточно богатой данным природным ресурсом страной. Как легко можно догадаться, производство цемента в Японии осуществляется на полном сырьевом самообеспечении.

Прошло уже почти двести с лишним лет с тех пор, как был изобретен такой удобный и дешёвый материал, как портландцемент. До этого многие здания и инфраструктуры строились с использованием так называемого цементного бетона. Давайте рассмотрим статистические данные касательно годовых расходов цемента на душу населения. На рис. 1.3 отражены изменения статистики расходов цемента на душу населения в Японии, Сингапуре, Южной Корее, Таиланде и Китае с 1950 по 2005 год. Из этих данных можно выделить несколько интересных моментов.

По словам профессора Оучи Масахио из Технического института префектуры Коти, анализирующего статистику по расходам цемента, расход цемента можно в общих чертах оценить через производство бетона. Как и в случае с подбором состава бетона в табл. 1.1, если допустить, что на изготовление 1 м<sup>3</sup>

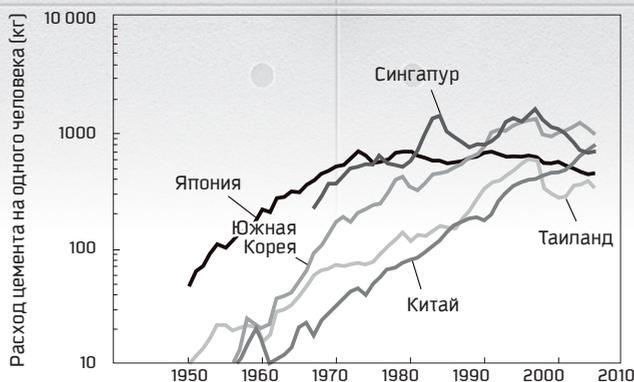


Рис. 1.3. Расход цемента на одного человека<sup>1</sup>  
(предоставлено профессором Оучи Масахиро  
из Технического института префектуры Коти)

обычного бетона используется около 300 кг цемента, можно рассчитать приблизительное количество производимого бетона. Учитывая, что основной целью применения бетона являются объекты социальной инфраструктуры, такие как многоэтажные здания, автодороги, железные дороги, плотины и портовые сооружения, валовое производство цемента можно косвенно оценить через совокупное количество возведенных построек и созданной инфраструктуры.

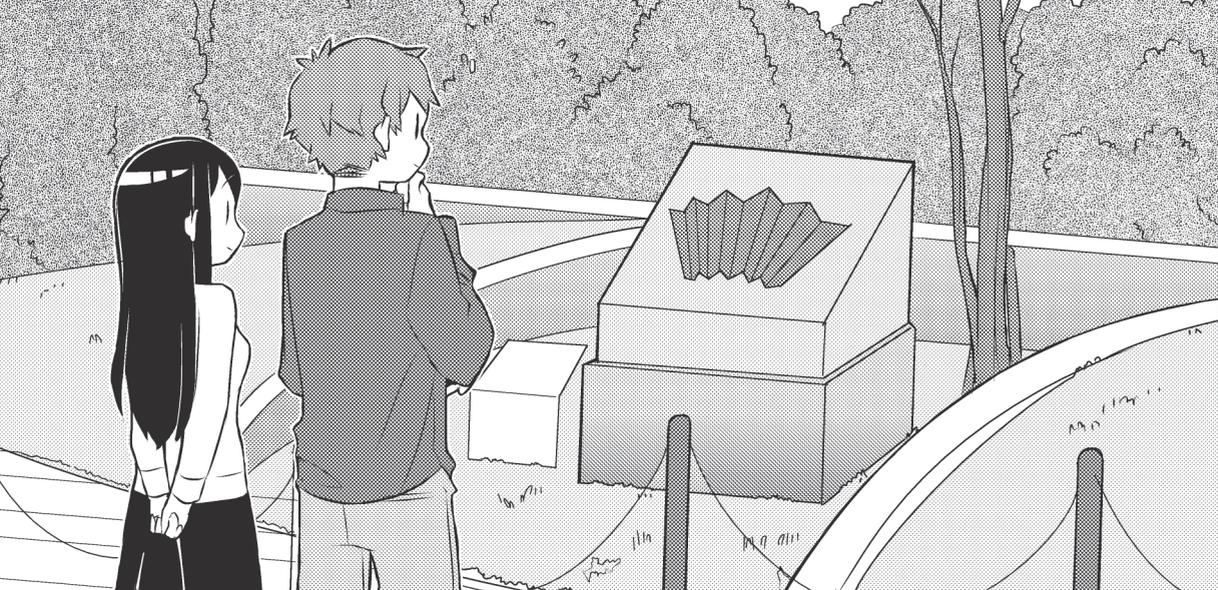
Судя по японским показателям, расход цемента с 1950 по 1970 год рос почти прямолинейно. Следует обратить внимание на то, что рост показателей не пропорциональный, а экспоненциальный, так как вертикальная ось графика на данной схеме построена по логарифмической шкале. Это означает, что ежегодные показатели расходов цемента растут в почти одинаковой пропорции (чуть более 10 %). До начала 1970-х годов расход цемента на душу населения вырос почти в 20 раз с 1950 года. Далее показатели то увеличиваются, то уменьшаются в зависимости от года, но расход цемента на человека сохраняется в пределах от 400 до 600 кг. Это даёт основания предположить, что после достижения определённого уровня строительство зданий и инфраструктуры непрерывно продолжало утилизироваться и самовоспроизводиться вследствие активного развития страны. Слегка меняя тему, известный в области молекулярной биологии господин Фукуока Синъити размышляет над первостепенным вопросом «Что такое жизнь?» в своей работе «Динамическое равновесие». По мнению господина Фукуока, жизнь есть «нечто, что на первый взгляд не меняет своё состояние, но на самом деле непрерывно продолжает разлагаться и вновь самовоспроизводиться, постоянно себя переделывая». Лежащие в основе поддер-

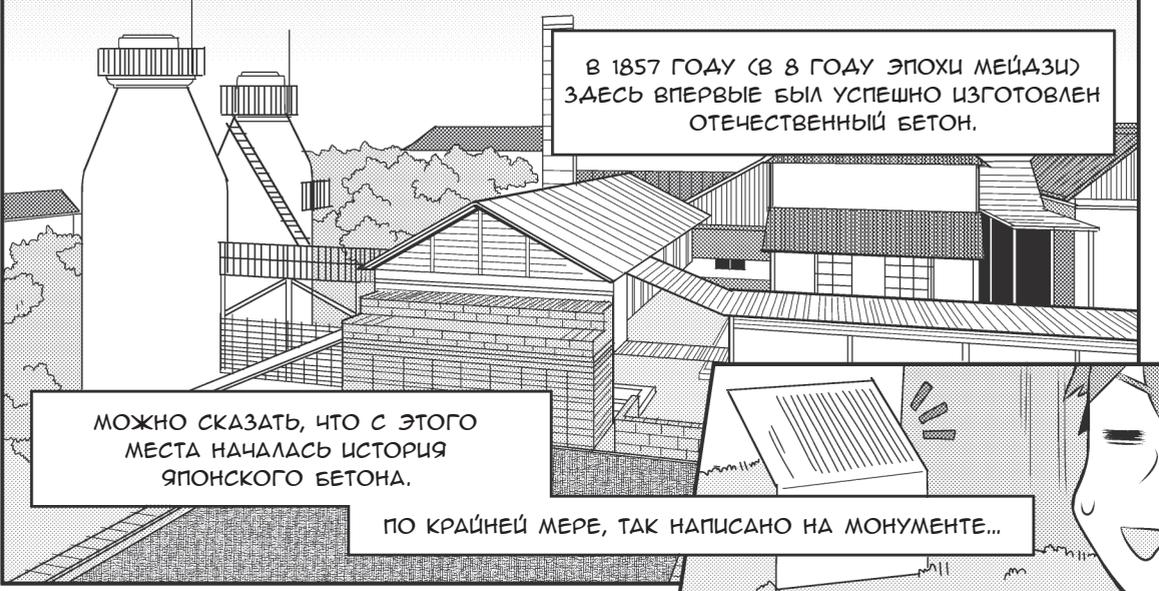
<sup>1</sup> Оучи Масахиро. Азиатские страны несколько лет назад: японцы? // Инженерно-строительный журнал. 2007. Вып. 92. № 5. С. 58–59.

живания цивилизации большие города и социальная инфраструктура ежедневно обновляются через цикл непрерывного разрушения и самовосстановления наподобие человеку. Возможно, что показатели 400–600 кг расхода цемента и 2 м<sup>3</sup> бетона и являются теми самыми заветными числами, необходимыми для поддержания постоянного обновления в нашей развитой стране. Определение истинной цены этих двух показателей требует дальнейшего анализа, однако приведённый выше факт сам по себе представляет особый интерес. Интересно, а какова ситуация в других странах? Как можно заметить, в других странах, включая Южную Корею, Таиланд и Китай, расходы цемента продолжают прямолинейно расти так же, как и в Японии. Глядя на статистику этих стран, создается ощущение, что график Японии просто слегка сдвинут вправо. В то время как Южная Корея отстаёт от Японии по показателям на 15 лет, в Китае наблюдается временная задержка на все 30 лет, что не мешает обеим странам в конечном счёте достигнуть состояния стабильности. Развитие страны в целом и рост отдельных городов – во многом аналогичные процессы. В ближайшее время Японии предстоит решить такие проблемы, как стареющее население, изнашивание инфраструктуры и устаревшие способы поддержания этой инфраструктуры. Исходя из одних показателей расходов цемента в других азиатских странах, помимо Японии, уже можно предположить, что эти страны вскоре будут иметь дело с точно такими же проблемами. Если Япония сможет в ближайшее время подобрать ключи к решениям этих проблем, не пойдёт ли это на пользу и её «товарищам по несчастью»? Хочется надеяться, что статистические данные касательно цемента помогут справиться с этими проблемами.

ГЛАВА 2

С КАКИХ ПОР  
ИСПОЛЬЗУЕТСЯ БЕТОН?





В 1857 ГОДУ (В 8 ГОДУ ЭПОХИ МЕЙДЗИ)  
ЗДЕСЬ ВПЕРВЫЕ БЫЛ УСПЕШНО ИЗГОТОВЛЕН  
ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ БЕТОН.

МОЖНО СКАЗАТЬ, ЧТО С ЭТОГО  
МЕСТА НАЧАЛАСЬ ИСТОРИЯ  
ЯПОНСКОГО БЕТОНА.

ПО КРАЙНЕЙ МЕРЕ, ТАК НАПИСАНО НА МОНУМЕНТЕ...



НЕОБХОДИМЫЕ В НАШЕЙ  
ЖИЗНИ БЕТОН И ЦЕМЕНТ  
ОБРЕЛИ НЫНЕШНИЙ  
ОБЛИК ИСКЛЮЧИТЕЛЬНО  
БЛАГОДАРЯ  
ПОЭТАПНОМУ  
УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ.

МОЖНО  
Я СЕГОДНЯ РАССКАЖУ  
ОБ ЭТОМ ПОПОДРОБНЕЙ?



ДА, ПОЖАЛУЙСТА!



ТОЛЬКО  
РАЗГОВАРИВАТЬ  
СТОЯ КАК-ТО  
НЕ ОЧЕНЬ КОМФОРТНО.  
МОЖЕТ, ПРОГУЛЯЕМСЯ  
ДО БЛИЖАЙШЕГО  
ПАРКА?

Ой, да-да,  
конечно!



## 2.1. ПРОИСХОЖДЕНИЕ БЕТОНА

ПОТЕНЦИАЛЬНОЕ СЫРЬЁ ДЛЯ БЕТОНА НАХОДЯТ НА МЕСТАХ РАСКОПОК В РАЗНЫХ УГОЛКАХ ЗЕМЛИ.



НЕУЖЕЛИ?!



ДА.

ПРАВДА, СУЩЕСТВУЮТ РАЗНЫЕ ВЕРСИИ КАСАТЕЛЬНО ИСТОКОВ ПРОИСХОЖДЕНИЯ САМОГО ДРЕВНЕГО БЕТОНА.



СОГЛАСНО НАИБОЛЕЕ УБЕДИТЕЛЬНОЙ ВЕРСИИ НА ДАННЫЙ МОМЕНТ, САМЫМ ДРЕВНИМ СЧИТАЕТСЯ БЕТОН, ИЗГОТОВЛЕННЫЙ 9000 ЛЕТ НАЗАД В ЮЖНОЙ ЧАСТИ РЕГИОНА ГАЛИЛЕЯ НА СЕВЕРЕ ИЗРАИЛЯ.

А ТАКЖЕ БЕТОН ИЗ ТЯНЬШУЯ ПЯТИТЫСЯЧЕЛЕТНЕЙ ДАВНОСТИ, ОБНАРУЖЕННЫЙ НЕДАЛЕКО ОТ СИАНЯ В КИТАЕ.

НЕУЖТО БЕТОН СУЩЕСТВУЕТ С ТАКИХ НЕЗАПАМЯТНЫХ ВРЕМЕН?!



НА РАСКОПКАХ ЖИЛИЩ  
В ТЯНЬШУЕ В КИТАЕ ВЫЯСНИЛОСЬ,  
ЧТО ПОХОЖИЙ НА ЦЕМЕНТ  
МАТЕРИАЛ ИСПОЛЬЗОВАЛСЯ  
ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛОВ.

А КАКОЙ В ТО ВРЕМЯ  
ИСПОЛЬЗОВАЛСЯ ЦЕМЕНТ?

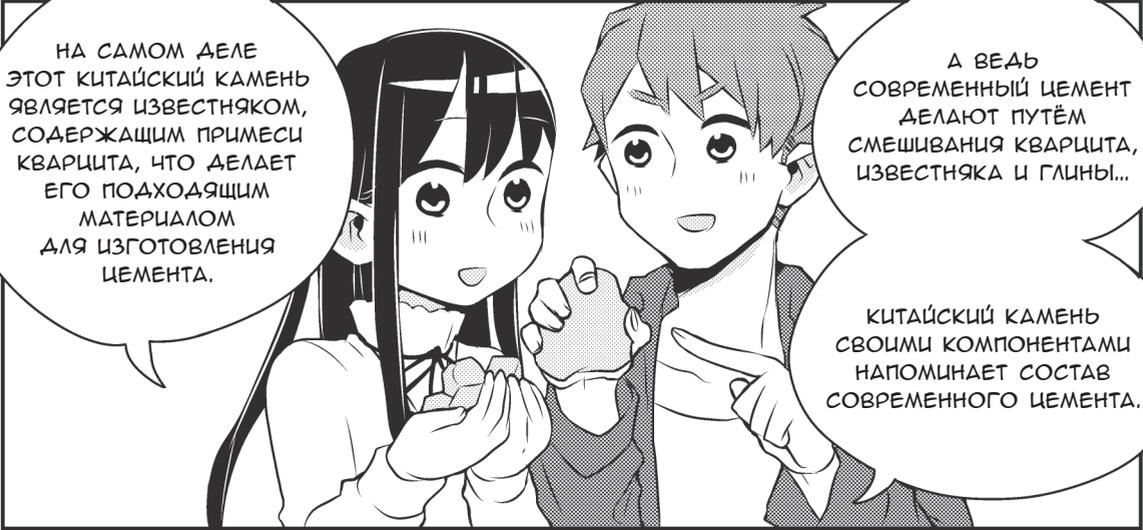


В КАЧЕСТВЕ СЫРЬЯ  
ПРЕДПОЛОЖИТЕЛЬНО  
ИСПОЛЬЗОВАЛСЯ ОСОБЫЙ  
КАМЕНЬ, ДОБЫВАЕМЫЙ  
В РЕГИОНЕ ТЯНЬШУЙ.

НА РАСКОПКАХ  
ТАКЖЕ НАШЛИ  
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПЕЧИ,  
В КОТОРЫХ НЕКОГДА,  
ВОЗМОЖНО, ЭТОТ КАМЕНЬ  
ПОДВЕРГАЛИ ОБЖИГУ  
ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ  
9000 ГРАДУСОВ.



А ПОЧЕМУ  
ПРИ ОБЖИГЕ КАМНЯ  
ПОЛУЧАЕТСЯ ЦЕМЕНТ?



НА САМОМ ДЕЛЕ  
ЭТОТ КИТАЙСКИЙ КАМЕНЬ  
ЯВЛЯЕТСЯ ИЗВЕСТНЯКОМ,  
СОДЕРЖАЩИМ ПРИМЕСИ  
КВАРЦИТА, ЧТО ДЕЛАЕТ  
ЕГО ПОДХОДЯЩИМ  
МАТЕРИАЛОМ  
ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ  
ЦЕМЕНТА.

А ВЕДЬ  
СОВРЕМЕННЫЙ ЦЕМЕНТ  
ДЕЛАЮТ ПУТЁМ  
СМЕШИВАНИЯ КВАРЦИТА,  
ИЗВЕСТНЯКА И ГЛИНЫ...

КИТАЙСКИЙ КАМЕНЬ  
СВОИМИ КОМПОНЕНТАМИ  
НАПОМИНАЕТ СОСТАВ  
СОВРЕМЕННОГО ЦЕМЕНТА.



Я ТУТ НЕМНОГО ИЗУЧИЛА  
ЕГО СВОЙСТВА И ВЫЯСНИЛА,  
ЧТО В ТЕ ВРЕМЕНА УЖЕ  
ИЗГОТОВЛИВАЛИ МАТЕРИАЛ\*,  
ПОХОЖИЙ НА ПОРТЛАНЦЕМЕНТ  
ПОНИЖЕННОЙ ТЕРМОСТОЙКОСТИ.

\* См. стр. 57.



УЖЕ 5000 ЛЕТ НАЗАД  
ИСПОЛЬЗОВАЛСЯ МАТЕРИАЛ,  
АНАЛОГИЧНЫЙ СОВРЕМЕННОМУ  
ЦЕМЕНТУ... ЧУВСТВУЕТЕ  
РОМАНТИКУ?!



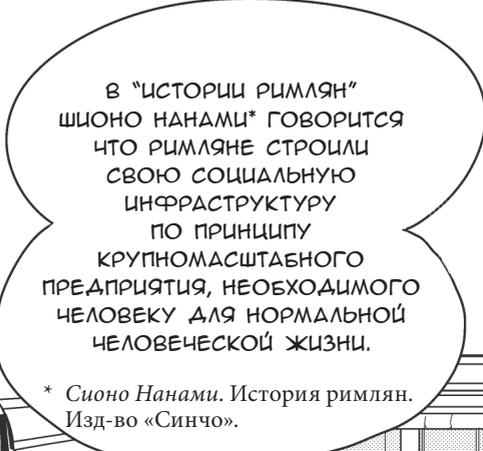
А-ДА,

КОНЕЧНО!

## 2.2. БЕТОН ДРЕВНЕГО РИМА



НЕСКОЛЬКИМИ  
ЭПОХАМИ ПОЗДНЕЕ  
ДРЕВНИЕ РИМЛЯНЕ  
АКТИВНО НАЧАЛИ  
ИСПОЛЬЗОВАТЬ БЕТОН.



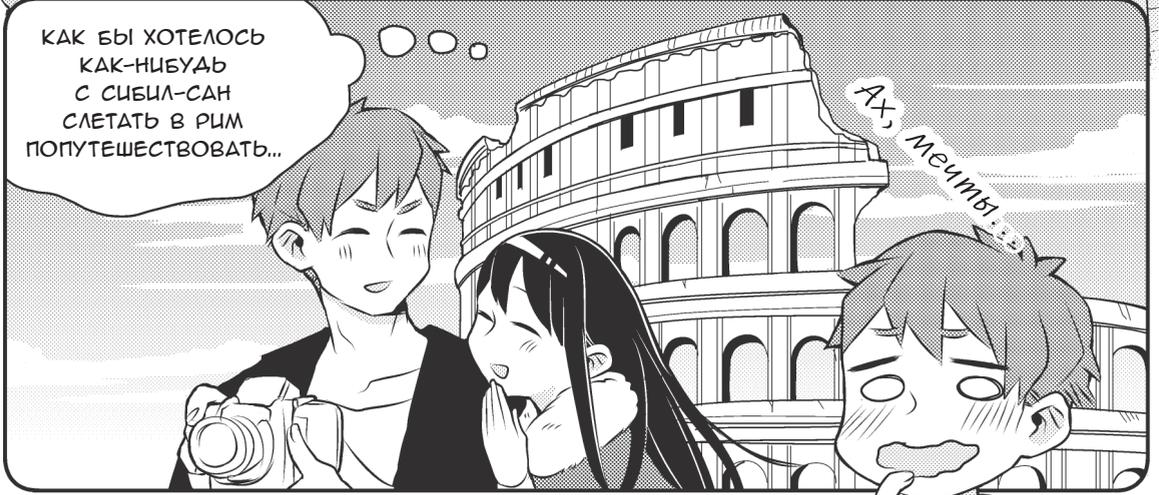
В "ИСТОРИИ РИМЛЯН"  
ШИНО НАНАМИ\* ГОВОРИТСЯ  
ЧТО РИМЛЯНЕ СТРОИЛИ  
СВОЮ СОЦИАЛЬНУЮ  
ИНФРАСТРУКТУРУ  
ПО ПРИНЦИПУ  
КРУПНОМАСШТАБНОГО  
ПРЕДПРИЯТИЯ, НЕОБХОДИМОГО  
ЧЕЛОВЕКУ ДЛЯ НОРМАЛЬНОЙ  
ЧЕЛОВЕЧЕСКОЙ ЖИЗНИ.

\* Сино Нанами. История римлян.  
Изд-во «Синчо».



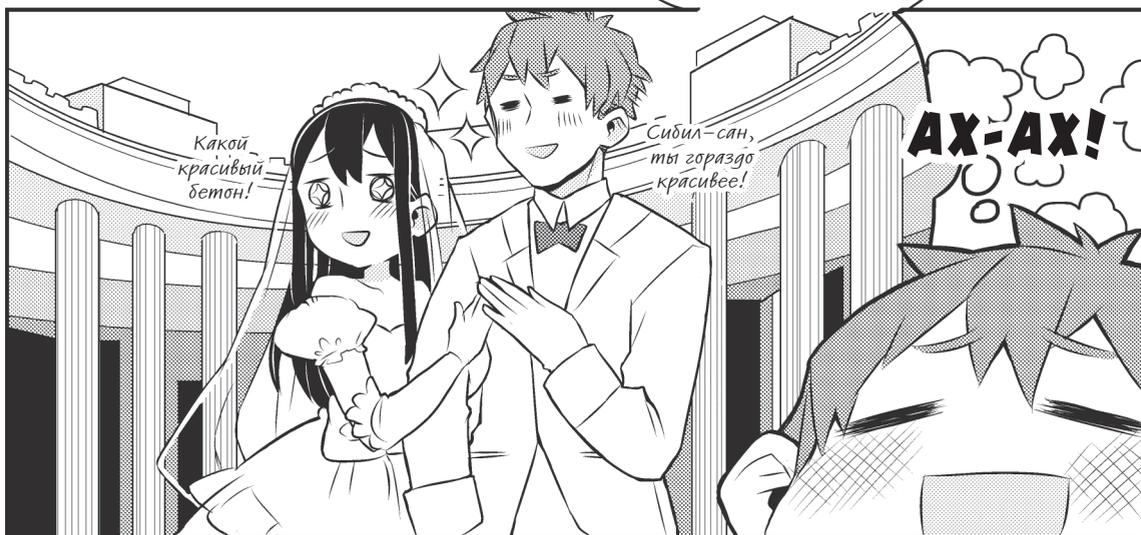
И ДЕЙСТВИТЕЛЬНО,  
САМЫЕ РАЗНЫЕ  
СООРУЖЕНИЯ, ВКЛЮЧАЯ  
ДОРОГИ, МОСТЫ, СИСТЕМЫ  
ВОДОСНАБЖЕНИЯ, ТЕАТРЫ,  
ОБЩЕСТВЕННЫЕ БАНИ  
И ЧАСТНЫЕ ДОМА...

...БЫЛИ ПОСТРОЕНЫ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕТОНА.  
БЛАГОДАРА ЭТОМУ МНОГЕ  
ПОСТРОЙКИ СМОГЛИ  
СОХРАНИТЬСЯ  
ДО НАШИХ ДНЕЙ.



КАК БЫ ХОТЕЛОСЬ  
КАК-НИБУДЬ  
С СИБИЛ-САН  
СЛЕТАТЬ В РИМ  
ПОПУТЕШЕСТВОВАТЬ...

Ах, мечта...





ПО-ПОЖАЛУЙСТА,  
ПРОДОЛЖАЙТЕ  
СВОЙ РАССКАЗ.



НУ...



БЕТОН ДРЕВНЕГО РИМА,  
ОБЛАДАЮЩИЙ МНОЖЕСТВОМ  
ПРЕВОСХОДНЫХ КАЧЕСТВ,  
ПОДВЕРГАЕТСЯ АНАЛИЗУ  
И ИССЛЕДУЕТСЯ УЧЁНЫМИ  
СО ВСЕГО МИРА.

И БЛАГОДАРЯ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМУ  
ПРОЕКТУ ПОД РУКОВОДСТВОМ  
ПРОФЕССОРА ДОЯГИ СЕЙКИ  
БЫЛО ВЫЯВЛЕНО,  
ЧТО НАЙДЕННЫЙ ПРИ РАСКОПКАХ  
СОММЫ-ВЕЗУВИАНЫ БЕТОН  
ТЫСЯЧЕЛЕТНЕЙ ДАВНОСТИ  
ВПОЛНЕ ЕЩЁ ПРИГОДЕН  
ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ!

КАК ЭТО ЗДОРОВО!



МЕЖДУ ПРОЧИМ,  
А С КАКИХ ПОР НАЧАЛИ  
ПОЛНОМАСШТАБНО  
ПРИМЕНЯТЬ БЕТОН  
В ЯПОНИИ?

ВЕДЬ В ОСНОВНОМ  
ЯПОНСКАЯ АРХИТЕКТУРА  
ТРАДИЦИОННО СОЗДАВАЛАСЬ  
ИЗ ДЕРЕВА?

### 1.3. ПРИМЕНЕНИЕ БЕТОНА В ЯПОНИИ

ВЫХОДИТ,

ДА, В ЯПОНИИ НАЧАЛИ ИСПОЛЬЗОВАТЬ БЕТОН ПОСЛЕ ЭПОХИ МЕЙДЗИ, КОГДА ПОЯВИЛИСЬ НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА.

СТРЕМЯСЬ ПОСТРОИТЬ СОВРЕМЕННОЕ ГОСУДАРСТВО, ПОСЛЕ ЭПОХИ МЕЙДЗИ В ЯПОНИИ НАЧАЛИ ПЕРЕХОДИТЬ НА ГРАЖДАНСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ УРОВНЯ ЖИЗНИ В СТРАНЕ.

ЧТО ИСТОРИЯ БЕТОНА В НАШЕЙ СТРАНЕ НАЧАЛАСЬ УЖЕ С СОВРЕМЕННОЙ ЭПОХИ.

В КАЧЕСТВЕ ПРИМЕРА КРУПНОМАСШТАБНОГО ПРОЕКТА ТОГО ВРЕМЕНИ СТОИТ УПОМЯНУТЬ СТРОИТЕЛЬСТВО ПОРТА ОТАРУ ПОД РУКОВОДСТВОМ ПРОФЕССОРА ХИРОИ ЦСАМИ.

ЭТОТ ПРОЕКТ ИЗВЕСТЕН СВОЕЙ МОНОМЕНТАЛЬНОСТЬЮ И В СФЕРЕ БЕТОННОГО СТРОИТЕЛЬСТВА.

ДА ЧТО ВЫ ГОВОРИТЕ?



ДА,  
ОДНОВРЕМЕННО  
СО СТРОИТЕЛЬСТВОМ ПЕРВОГО  
В ЯПОНИИ МАССИВНОГО  
БЕТОННОГО ВОЛНОРЕЗА...

БЫЛО СКОНСТРУИРОВАНО  
ШЕСТЬДЕСЯТ ТЫСЯЧ  
ИЗВЕСТКОВЫХ БРИКЕТОВ  
(ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ)  
ДЛЯ ПРОВЕРКИ  
НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ  
ЦЕМЕНТНОГО МАТЕРИАЛА.

ЦЕЛЫХ ШЕСТЬДЕСЯТ  
ТЫСЯЧ - ВОТ ЭТО  
ЦИФРА!

ИСПЫТАНИЯ НА РАСТЯЖЕНИЕ  
ДЛЯ ПРОВЕРКИ НА ПРОЧНОСТЬ  
ПРОВОДЯТСЯ РАЗ В ПЯТЬ ЛЕТ  
И ПО СЕЙ ДЕНЬ.

Ничего себе...

ДААННЫЕ, СОБРАННЫЕ  
НА ПРОТЯЖЕНИИ БОЛЕЕ СТА ЛЕТ  
В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ, ПРЕДСТАВЛЯЮТ  
ОСОБУЮ ЦЕННОСТЬ И НА МИРОВОМ УРОВНЕ.  
БЛАГОДАРИЯ ЭТИМ ДАННЫМ БЫЛО ДОКАЗАНО,  
ЧТО БЕТОН ВПОЛНЕ ГОДИТСЯ  
ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СУРОВЫХ УСЛОВИЯХ  
ОКЕАНИЧЕСКОЙ СРЕДЫ.

## 1.4. ДОЛГОВЕЧНОСТЬ БЕТОНА



И ВОТ, В ХОДЕ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ, ОСНОВАННЫХ НА РАСЧЁТАХ, ПРОИЗВЕДЁННЫХ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СИМУЛЯЦИЙ В РЕЖИМЕ УСКОРЕННОГО ВРЕМЕНИ, БЫЛИ ПРОВЕДЕНЫ ПЕРВЫЕ ПОПЫТКИ ВОССОЗДАНИЯ БУДУЩЕГО ОБЛИКА ЦЕМЕНТА И БЕТОНА ЧЕРЕЗ ДЕСЯТКИ ТЫСЯЧ ЛЕТ.



**ПОСТАРЕЛ**

КАК-НИКАК МЫ ЖЕ НЕ МОЖЕМ ПРОВОДИТЬ ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА ПРОТЯЖЕНИИ ДЕСЯТКОВ ТЫСЯЧ ЛЕТ...



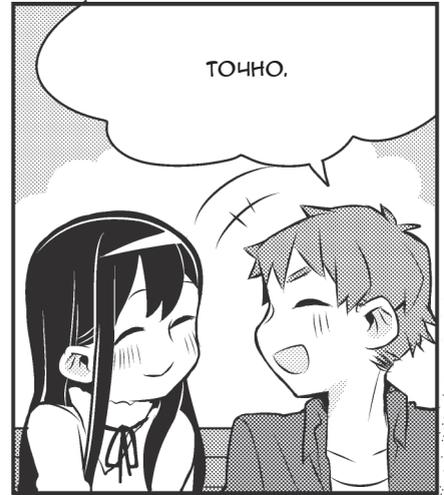
ТАК-ТО ОНО ТАК, НО ИМЕННО НА ОСНОВАНИИ АНАЛИЗА БЕТОНА В ТЕЧЕНИЕ НЕСКОЛЬКИХ ДЕСЯТКОВ ТЫСЯЧ ЛЕТ МОЖНО ПОЛУЧИТЬ ДАННЫЕ, ПОДТВЕРЖДАЮЩИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ЭТОГО МАТЕРИАЛА.

НУ, ЧТО НАЗЫВАЕТСЯ "ВЕК ЖИВИ, ВЕК УЧИТЬСЯ".





С ДРУГОЙ СТОРОНЫ,  
ЭТО ТОЛЬКО  
ПОДЧЕРКИВАЕТ ВАЖНОСТЬ  
ДОЛГОВЕЧНОСТИ БЕТОНА  
ДЛЯ ПОДДЕРЖАНИЯ НАШЕЙ  
ПОВСЕДНЕВНОЙ ЖИЗНИ!



ТОЧНО.



Я ОЧЕНЬ ХОЧУ ПРОДЛИТЬ  
ПРЕБЫВАНИЕ БЕТОНА,  
КОТОРЫЙ Я ЛЮБЛЮ ВСЕЙ  
ДУШОЙ, В МИРЕ ЛЮДЕЙ  
НА КАК МОЖНО БОЛЕЕ  
ДОЛГИЙ СРОК!!!



ЧТО ВЫ, ВОВСЕ НЕТ!

Я ТАК МНОГОМУ  
ОТ ВАС УЧУСЬ!

ТОГДА ХОРОШО!

ВЫ ПЕРВЫЙ,  
КТО ВОТ ТАК ВОТ ХОДИТ СО МНОЙ  
И СЛУШАЕТ МОИ РАССКАЗЫ,  
И МНЕ ЭТО ОЧЕНЬ ПРИЯТНО!

Я ТОЖЕ,  
КОГДА ВЫПУЩУСЬ  
ИЗ УНИВЕРСИТЕТА,  
ОБЯЗАТЕЛЬНО СТАНУ  
ДОСТОЙНЫМ  
АРХИТЕКТОРОМ!!!

ОГО, Я БУДУ  
ЗА ВАС БОЛЕТЬ!

Я это сделаю!

хлоп!

хлоп!

В ДУШЕ Я ПОКЛЯЛСЯ ИЗУЧИТЬ ВСЁ ПРО БЕТОН  
ОТ КОРКИ ДО КОРКИ, ЧТОБЫ ПОТОМ Я МОГ РАБОТАТЬ  
ВМЕСТЕ С СЕЦЦЛ-САН.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ СПРАВКИ

### Бетон Древнего мира

Как уже было сказано выше, одной из важнейших находок для исследования применения бетона в Древнем мире стали раскопки руин жилищ в Тяньшуге в Китае 1980-х годов. Было выявлено, что фундамент жилищ пятитысячелетней давности строился на основе материала, подобного бетону. Также на раскопках были найдены печи для обжигания цемента. Предположив, что использовавшийся для бетона того времени цемент был получен из особого камня рёкёсеки, основными компонентами которого являются карбонат кальция и глина, команда профессора Асага Киёси попыталась воспроизвести бетон Древнего мира, используя руду рёкёсеки в качестве сырья. Добытую неподалеку от Тяньшуга руду камня рёкёсеки обжигали на протяжении 8 часов при температуре 800–1000 °С в соответствии с предполагаемыми условиями обработки этой руды 5000 лет назад. После подробного анализа химического состава полученного цемента стало ясно, что он состоит из основного компонента портландцемента – белита (двухкальциевого силиката  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ , сокращённо  $\text{C}_2\text{S}$ ). Далее, испытав реконструированный бетон Древнего мира в тесте на прочность, выявили, что полученный материал имеет свойство с течением времени постепенно повышать прочность на сжатие, подобно портландцементу низкой термостойкости, имеющему в своём составе высокий процент содержания белита. О портландцементе низкой термостойкости, а также о белите будет подробно рассказано в главе 3.



Рис. 2.1. Бетон Древнего Рима, найденный при раскопках руин Соммы-Везувианы<sup>1</sup> (предоставлено профессором Сакаи из Токийского технологического института)

<sup>1</sup> Асага Киёси, Даймон Масаки и др. О воспроизведении цемента 5000-летней давности. 1999. № 53. С. 205–212.

Тем не менее первыми, кто начал использовать бетон в качестве полноценного строительного материала, были древние римляне. В Древнеримской империи, где инфраструктура создавалась в качестве «крупномасштабного предприятия, необходимого человеку для нормальной человеческой жизни»<sup>1</sup>, различные сооружения, такие как дороги, мосты, порты, храмы, гражданские постройки, площади, системы водоснабжения и прочее, строились с целью создать основу для богатой цивилизованной жизни, поражающей своей обеспеченностью даже нас, живущих в современном мире. До падения Римской империи содержание всей этой инфраструктуры поддерживалось правительством. Воистину, как говорится в пословицах, «Рим не за один день построили» и «Все дороги ведут в Рим». Бетонный материал, созданный древними римлянами, поддерживал цивилизацию Древнего Рима, а уже позднее построенные из него многие сооружения сохранились в виде руин по всей территории Европы.

В чем же различие между бетоном Древнего Рима и современным бетонным материалом? Отдел по бетонному строительству Японского комитета гражданских инженеров выпустил отчет, в котором сравниваются особенности обоих видов бетона (табл. 2.1). В отличие от современного бетона, в Древнем Риме при изготовлении бетона в качестве сырья использовались цемент и примеси, в которых более плавно протекала реакция гидратации. Иными словами, главным свойством, отличающим древнеримский бетон от его современного аналога, является его способность проводить реакции с добавлением пуццоланы. Под реакцией с пуццолой подразумевается реакция между кремнезёмом ( $\text{SiO}_2$ ) или оксидом алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) с гидроксидом кальция. Эта реакция протекает достаточно медленно, но в таком механизме, требующем длительного времени, есть особый смысл – в случае с бетоном благодаря долгой реакции с пуццолой повышаются прочность и долговечность конечного продукта. Производимая угольными электростанциями летучая зола, используемая в качестве примесей при производстве современного бетона, также является сырьём, затвердевающим в ходе реакции с пуццолой, аналогично древнеримскому бетону.

Название реакции с пуццолой происходит от пуццоланы, использовавшейся в качестве присадки для древнеримского бетона. Пуццолана представляет из себя высококачественный вулканический пепел, добываемый преимущественно у города Баколи, недалеко от Неаполя. Добавление этой примеси способствует повышению прочности и водонепроницаемости изготавливаемого бетона. На данный момент известно, что главным компонентом в составе пуццоланы является вулканический пепел с высоким содержанием кремнезёма.

---

<sup>1</sup> Сионо Нанами. Все дороги ведут в Рим. История римлян. 2001.

**Таблица 2.1. Сравнение бетонного сырья Древнего Рима и Новейшего времени (взято из <sup>1</sup>, частично изменено)**

	Древний Рим	Новейшее время
<b>Цемент</b>	Основным сырьевым компонентом является негашеная известь, полученная в результате гидратации обожжённой извести. Использовалась медленная реакция с пуццолой между гашёной известью и заполнителем, а также карбонизация для затвердения материала	Главными составляющими являются силикаты кальция алит и беллит. Цемент затвердевает в ходе реакции гидратации силикатов кальция ( $C_3S$ , $C_2S$ )
<b>Мелкий заполнитель</b>	Горный песок, морской песок, речной песок	Песок, щебень, искусственный лёгкий заполнитель, шлаковый заполнитель. Также материал из частиц приблизительно такого же размера, как и у предыдущих четырёх. В основном размер частиц меньше 5 мм
<b>Крупный заполнитель</b>	Используются обломки кирпичей и каменный материал. Среди каменного материала часто встречаются туфообразные горные породы. Вдобавок к крупному заполнителю, чей диаметр превышает 10 мм, также используется каменный материал, минимальный размер отдельных частиц которого не помещается в руке	Заполнитель, в составе которого преобладают частицы размером более 5 мм. Японскими промышленными стандартами утверждены нормы для частиц размером в 20, 25 и 40 мм
<b>Примеси для бетона</b>	Пуццолана использовалась в случаях потребности в повышенной устойчивости или быстром затвердевании в качестве гидравлической добавки при строительстве в водной среде	В зависимости от цели применения используются такие виды сырья, как гранулированный доменный шлак, летучая зола и тонкая кремнезёмная пыль
<b>Добавки (присадки) для бетона</b>	Нефть использовалась в качестве замедлителя схватывания бетона в случае необходимости в расшивке бетонных швов	В зависимости от цели применения используются такие примеси, как пластификатор, диспергатор, замедлитель схватывания, и загуститель

## Использование примесей для бетона

Поскольку речь зашла о вулканическом пепле и летучей золе, использующих реакцию с пуццолой, давайте немного разъясним ситуацию с примесями. Примесями называются сыпучие вещества и химические растворы, примешиваемые к бетону для улучшения свойств свежего бетона и снижения теплоты гидратации (гл. 3), повышения прочности и долговечности затвердевшего бетона, а также в последнее время для уменьшения негативного воздействия на окружающую среду. Сыпучие вещества, массу которых необходимо учитывать при подборе состава бетона из-за добавления их в значительном количестве, называются **примесями**, в то время как используемые в небольших количествах

<sup>1</sup> Бетон Древнего Рима: исследования и анализ бетона, найденного на раскопках Соммы-Везувианы // Библиотека бетона 131. Научное общество гражданского строительства Японии. 2009.

вах химические растворы вроде пластификаторов называются **присадками**. На данный момент среди наиболее широко применяемых основных примесей стоит выделить следующие: *гранулированный доменный шлак*, получаемый с помощью резкого охлаждения с последующим измельчением из обычного доменного шлака, образующегося как побочный продукт при изготовлении предельного чугуна в доменной печи; *летучая зола*, получаемая при сжигании угольного пепла на теплоэлектростанциях. Эти примеси частично замещают цемент в качестве его заменителей. Доменный шлак и летучая зола, по сути, являются побочными продуктами при производстве железа и тепловой энергии. Учитывая их особенности, если использовать их с умом параллельно функции связующих материалов, можно понизить выделяемую в первоначальный период теплоту гидратации и повысить долговечность бетона. Следовательно, эти примеси можно считать прекрасными ресурсами не только из-за того, что они улучшают свойства бетона, но и поскольку использование этих промышленных отходов благоприятно сказывается на окружающей среде.

Как уже ранее было сказано, летучая зола и тонкая кремнезёмная пыль затвердевают в ходе реакции с пуццоланой. Затвердевание происходит за счёт взаимодействия с гидроксидом кальция, образующимся в ходе реакции гидратации портландцемента. Гранулированный шлак обладает скрытым гидравлическим свойством. При наличии щелочного активатора он реагирует с гидроксидом кальция, образующимся из цемента, с образованием гидроксилатов, гидроалюминатов и гидросульфалюминатов кальция. Реакция с пуццоланой летучей золы и реакция гидратации гранулированного доменного шлака с его скрытым гидравлическим свойством протекают медленнее по сравнению с реакцией портландцемента, в связи с чем требуют дополнительного усовершенствования исходного сырья.

## История появления бетона в Японии (строительство порта Отару и столетняя проверка бетона на прочность)<sup>1</sup>

В соответствии с общепринятым противопоставлением европейской культуры как «культуры камня» японской культуре – «культуре дерева» японские сооружения традиционно возводились из дерева. Применение бетона в строительстве получило распространение одновременно с внедрением технологии портландцемента после реставрации Мейдзи. Внедрение инфраструктуры, включая строительство железных дорог и портов, проходило в ускоренном темпе ради достижения уровня западных держав с целью усилить страну по военным и экономическим показателям в ходе промышленного развития. В качестве

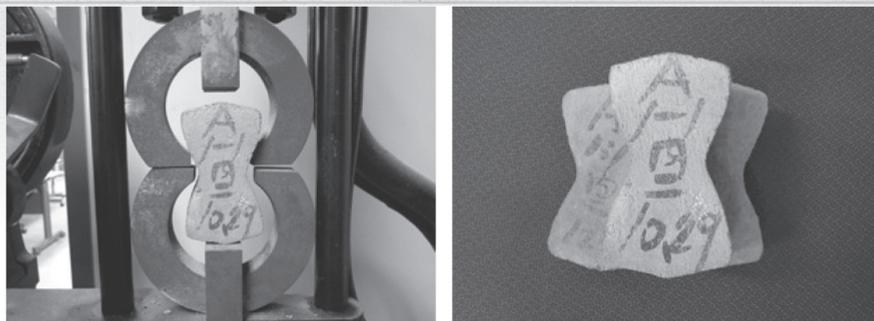
---

<sup>1</sup> Долговечность бетона на примере испытаний бетона в порту Отару / под ред. Нагатаки Сигеёси. 1995.

примера одного из подобных государственных проектов можно привести строительство порта Отару. В свое время профессор Хирои учился в сельскохозяйственном училище города Саппоро вместе с Учимура Кандзо и Нитобе Инадзо, а в своей дальнейшей карьере работал на постах профессора этого же училища, главного инженера префектуры Хоккайдо, а также профессора Токійского Императорского университета. Профессор Хирои является настолько выдающимся инженером в сфере гражданского строительства, что его называют отцом портовой инженерии.

Строительство северного волнореза порта Отару началось в 1897 году (30-й год эпохи Мейдзи). Из-за образования трещин в бетонных блоках при ранее происходившем строительстве порта Йокогама и военного порта Сасебо профессор Хирои отнесся с особым вниманием к анализу, проектированию, моделированию и конструированию волнореза, поскольку это был первый в Японии проект сооружения подобного объекта, выдающегося в открытое море. Возведение волнореза длиной 1289 м и глубиной 15 метров заняло 10 лет. Строительство волнореза осуществлялось из фигурных бетонных блоков, уложенных наискось при помощи тяжелого оборудования. Это строительство стало феноменальным событием для Японии. В то же время было изготовлено шестьдесят тысяч испытательных известковых брикетов (рис. 2.2) с целью проверки цементного материала на долговечность. Таким образом был реализован грандиозный проект с перспективой периодических контрольных испытаний бетонных конструкций на долгосрочной основе.

Известковые брикеты имеют форму тыквы-горлянки, благодаря чему на их вогнутой части проводятся испытания прочности на растяжение. При изготовлении образцов известковых брикетов использовалось 13 видов цемента, 10 видов мелкого заполнителя и 15 видов вулканического пепла, причем каждый компонент хранится соответственно в воздушной среде, пресной и морской воде. Причина использования вулканического пепла заключается в том, что он помогает сохранять устойчивость бетона в морской воде, а также позволял экономить на материальных расходах, частично заменяя цемент, который ранее являлся очень дорогостоящим материалом. Исходя из результатов последующих испытаний на долговечность было выявлено, что образцы, содержавшие в составе вулканический пепел, имели наиболее высокие показатели прочности на растяжение, что доказало способность бетона выдерживать воздействие агрессивной океанической среды. Таким образом, можно сказать, что подтвердилась проницательность профессора Хирои.



*Рис. 2.2. Испытательные известковые брикеты  
(из личного архива автора)*



*Рис. 2.3 Северный волнорез порта Отару  
(из личного архива автора)*

## Долговечность бетона

В этой главе много внимания было уделено бетону, о котором известно благодаря найденным древнекитайским руинам в Тяньшуге, благодаря разбросанным по всей Европе остаткам городских сооружений Древнего Рима, а также благодаря проекту по столетнему испытанию бетона на прочность, проводимому в Японии, начиная с эпохи Мейдзи. Отдельный интерес представляет изучение особенностей материалов, используемых в древности при строительстве жилищ, поскольку они могут многое сказать о жизни тех времен. В связи с этим не следует забывать о том, что разгадка тайн древнего бетона предоставляет

нам бесценную информацию, дающую ключ к усовершенствованию нашей современной жизни в будущем.

Бетонные сооружения являются инфраструктурой, поддерживающей нашу жизнь, защищая человека от угроз природных катаклизмов и обеспечивая нам комфортную и удобную жизнь в современном мире. Вполне возможно, что она будет использоваться на протяжении десятков, а может быть, даже и сотен тысяч лет в самых разных средах. Следовательно, если сделать прочный долговечный бетон, наши потомки смогут унаследовать и передать следующим поколениям созданную нами высококачественную социальную инфраструктуру. В бетоне, который остаётся в очень хорошем состоянии даже несмотря на суровые климатические условия, например бетон порта Отару, кроется подсказка обеспечения долговечности. Эти знания необходимо внедрять в новейшие исследования и проектирования.

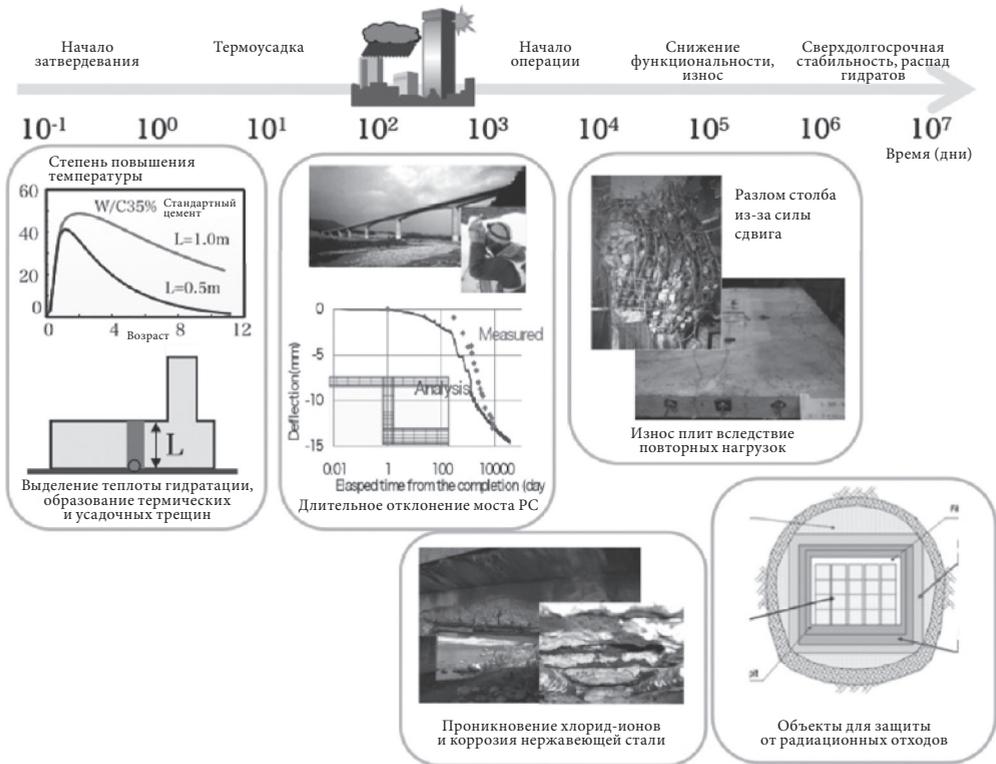


Рис. 2.4. Пример аналитической модели для прогнозирования свойств бетонных сооружений<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Koichi Maekawa, Tetsuya Ishida. Toshiharu KISHI: Multi-scale modeling of structural concrete. Taylor and Francis, 2009.

В последнее время началось обсуждение проекта по внедрению инфраструктуры из цементного материала с барьерной функцией для утилизации радиоактивных отходов атомных электростанций. Сам по себе бетон обладает способностью защищать от радиации благодаря повышенному содержанию воды, как в виде жидкости, так и в составе гидратов. Однако в связи с необходимостью изоляции радиоактивных веществ от среды обитания человека на протяжении десятков тысяч лет возникает проблема придания бетону сверхдолгосрочной устойчивости. Имея дело с временными рамками в десятки тысяч лет, процесс проектирования нуждается в решении проблемы постепенного вымывания кальция из структуры отвердителя цемента под названием гидрат C-S-H, что на примере проблем человеческого здоровья, по сути, напоминает остеопороз. Данный феномен не вызывает сложностей в рамках нескольких сотен лет. Для прогнозирования же облика бетона через несколько десятков тысяч лет применяют математическое моделирование и анализ данных, собранных в ускоренных испытаниях на надёжность<sup>1</sup>. Несмотря на то что важность подобных исследований не вызывает сомнений, найденный на раскопках бетон Древнего Рима и цемент Древнего Китая, в действительности продемонстрировавший свою прочность на протяжении нескольких тысяч лет, представляют из себя более ценный материал для подтверждения долговечности. Придание бетону сверхдолгосрочной устойчивости на основе совмещения разностороннего анализа древнего бетона с новейшими теориями и моделями является в дальнейшем главной исследовательской задачей в сфере бетонного строительства.

---

<sup>1</sup> Koichi Maekawa, Tetsuya Ishida. Toshiharu KISHI: Multi-scale modeling of structural concrete. Taylor and Francis, 2009.

## ГЛАВА 3

# СВОЙСТВА СВЕЖЕЙ БЕТОННОЙ СМЕСИ И РЕАКЦИЯ ГИДРАТАЦИИ

В ЭТОТ ДЕНЬ МЫ С СИБИЛ ПОСЕТИЛИ  
СТРОИТЕЛЬНУЮ ПЛОЩАДКУ ЛИНИИ  
СИНАГАВА СТОЛИЧНОЙ СКОРОСТНОЙ  
КОЛЬЦЕВОЙ ДОРОГИ.

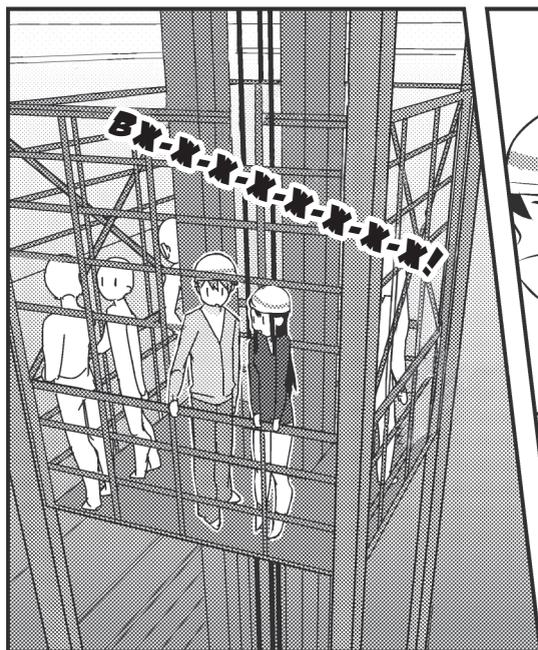
Строительство  
проходческого щита

ОГО!

ТАКОЕ ОЩУЩЕНИЕ,  
БУДАТО СТРОЯТ  
СЕКРЕТНУЮ БАЗУ!

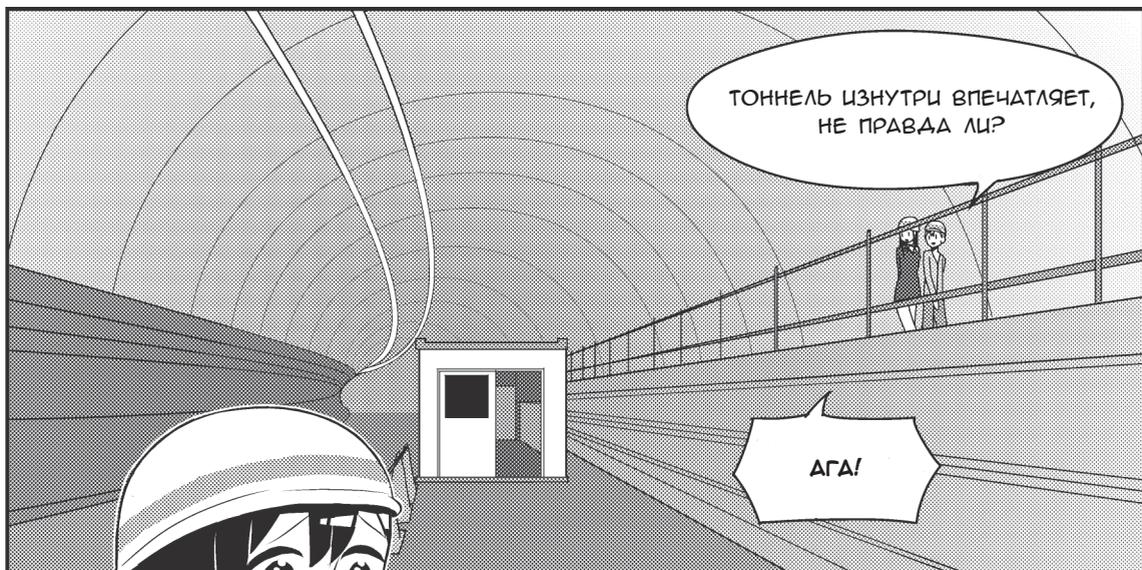
А-ХА-ХА!

МНЕ ТАК  
НЕ ТЕРПИТСЯ  
ЗАГЛЯНУТЬ  
ВНУТРЬ!



ОХ, КАК Я ЛЮБЛЮ  
АТМОСФЕРУ  
СТРОЙКИ!

А ТУТ  
ДОВОЛЬНО-ТАКИ  
ГЛУБОКО!



ДА.

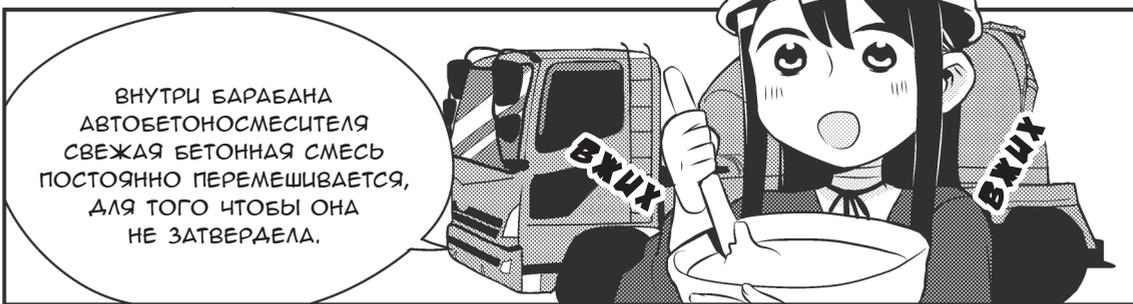
НА ЗАВОДЕ  
ИЗГОТАВЛИВАЮТ ТАК  
НАЗЫВАЕМЫЕ **БЕТОННЫЕ  
СЕКМЕНТЫ**, КОТОРЫЕ  
ПЕРЕВОЗЯТ НА МЕСТО  
СТРОИТЕЛЬСТВА ТОННЕЛЯ  
И СОЕДИНЯЮТ МЕЖДУ  
СОБОЙ.

ПОХОЖЕ НА 3D-ПАЗЛ...

В ТО ВРЕМЯ КАК В СТРОИТЕЛЬСТВЕ  
САМОГО ТОННЕЛЯ ИСПОЛЬЗУЮТСЯ  
ГОТОВЫЕ БЕТОННЫЕ СЕКМЕНТЫ,  
В НЕКОТОРЫХ ДРУГИХ ЧАСТЯХ, НАПРИМЕР  
В ДОРОЖНОМ ПОКРЫТИИ, ИСПОЛЬЗУЮТ  
ОБЫЧНЫЙ БЕТОН.

АХ, ВОТ ОНО ЧТО...

ВОН, СМОТРИТЕ, ЕДЕТ  
**АВТОБЕТОНОСМЕСИТЕЛЬ**,  
ПЕРЕВОЗЯЩИЙ СВЕЖУЮ  
БЕТОННУЮ СМЕСЬ.



ВНУТРИ БАРАБАНА  
АВТОБЕТОНОСМЕСИТЕЛЯ  
СВЕЖАЯ БЕТОННАЯ СМЕСЬ  
ПОСТОЯННО ПЕРЕМЕШИВАЕТСЯ,  
ДЛЯ ТОГО ЧТОБЫ ОНА  
НЕ ЗАТВЕРДЕЛА.



РАЗ УЖ ЗАШЛА  
ОБ ЭТОМ РЕЧЬ,  
МОЖЕТ, Я СНАЧАЛА  
РАССКАЖУ О СВЕЖЕЙ  
БЕТОННОЙ СМЕСИ\*

АГА!

### 3.1. СВОЙСТВА СВЕЖЕЙ БЕТОННОЙ СМЕСИ



СВЕЖАЯ БЕТОННАЯ СМЕСЬ  
ПОСЛЕ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ  
НА ПРОТЯЖЕНИИ НЕСКОЛЬКИХ ЧАСОВ  
ОСТАЁТСЯ МЯГКОЙ И НЕ ЗАТВЕРДЕВАЕТ.



ОДНАКО ЧЕРЕЗ ОПРЕДЕЛЁННОЕ ВРЕМЯ  
ПОСЛЕ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ СВОЙСТВА БЕТОНА  
ИЗМЕНЯЮТСЯ, И ПОЭТОМУ ЕГО НУЖНО  
ДОСТАВИТЬ НА МЕСТО КАК МОЖНО СКОРЕЕ.

\* По стандартной спецификации бетона допустимое время после перемешивания до заливки бетона при температуре ниже 25 °С – 2 ч, а при температуре выше 25 °С – 1,5 ч.

ПОЭТОМУ БЕТОННЫЕ ЗАВОДЫ НАХОДЯТСЯ  
В КАЖДОМ РЕГИОНЕ ПО СТРАНЕ, ЧТОБЫ МОЖНО  
БЫЛО БЫСТРО ДОСТАВИТЬ БЕТОН ДО МЕСТА  
СТРОИТЕЛЬСТВА, ТАК?

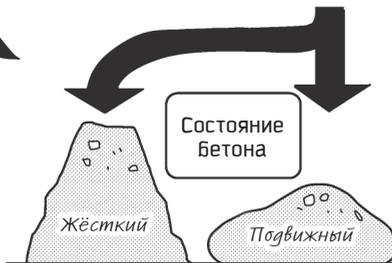
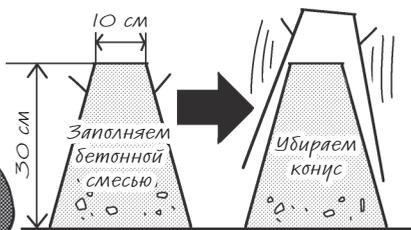
А ЧТО ДАЛЬШЕ  
ДЕЛАЮТ СО  
СВЕЖЕЙ  
БЕТОННОЙ  
СМЕСЬЮ ПОСЛЕ  
ТОГО, КАК ОНА  
ПРИЕХЛА  
НА МЕСТО?

СОВЕРШЕННО  
ВЕРНО.

ПРЕЖДЕ ВСЕГО  
ДЛЯ КОНТРОЛЯ  
КАЧЕСТВА БЕТОНА  
ИСПОЛЬЗУЮТ МЕТОД  
ОСАДКИ КОНУСА\*.

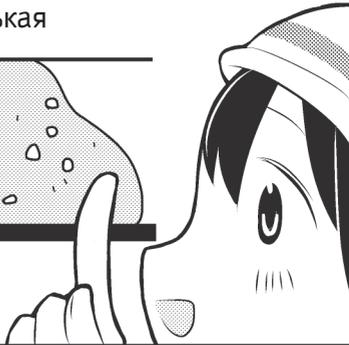
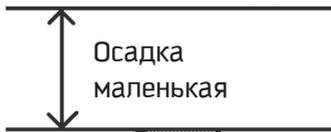
Кроме того ещё проверяют прочность бетона, замерыют содержание воздуха. Иногда также проверяют содержание воды.

МЕТОД ОСАДКИ КОНУСА  
ЗАКЛЮЧАЕТСЯ В СЛЕДУЮЩЕМ:  
В СПЕЦИАЛЬНЫЙ КОНУС ЗАКЛАДЫВАЮТ  
БЕТОННУЮ СМЕСЬ, А ЗАТЕМ ПОСЛЕ  
СНЯТИЯ КОНУСА ЗАМЕРЯЮТ,  
НАСКОЛЬКО ОСЕЛА  
ОБРАЗОВАВШАЯСЯ  
ГОРКА БЕТОНА.

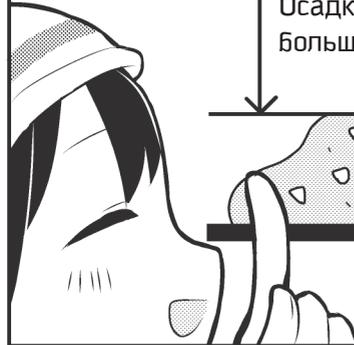
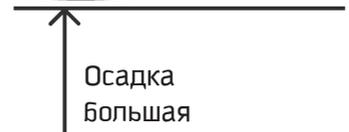


эээ...

В ОБЩЕМ СЛУЧАЕ В ГРАЖДАНСКОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ИСПОЛЬЗУЕТСЯ ЖЁСТКИЙ БЕТОН С МАЛЕНЬКОЙ ОСАДКОЙ КОНУСА.



А В АРХИТЕКТУРЕ ИСПОЛЬЗУЕТСЯ ПОДВИЖНЫЙ БЕТОН С БОЛЬШЕЙ ОСАДКОЙ КОНУСА.



ЭТО ЕЩЁ ПОЧЕМУ?

ОСНОВНАЯ ПРИЧИНА В ТОМ, ЧТО КОМПОНЕНТЫ АРХИТЕКТУРНЫХ ОБЪЕКТОВ ОБЫЧНО МЕНЬШЕ В ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ, ПО СРАВНЕНИЮ С ОБЪЕКТАМИ ГРАЖДАНСКОГО СТРОИТЕЛЬСТВА.

КРОМЕ ТОГО, В АРХИТЕКТУРНЫХ ОБЪЕКТАХ ТРЕБУЕТСЯ РАЗМЕЩАТЬ МНОГО АРМАТУРЫ И РАЗЛИЧНЫХ ТРУБ, И ЧТОБЫ В ЭТОМ СЛУЧАЕ ЛЕГЧЕ БЫЛО ЗАЛИТЬ ОПАЛУБКУ, ТРЕБУЕТСЯ БОЛЕЕ ПОДВИЖНЫЙ БЕТОН.

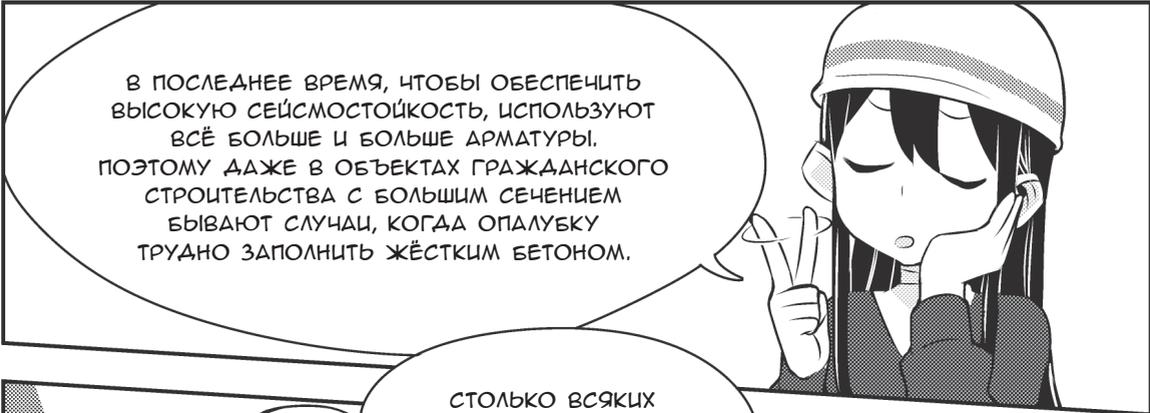
ТЕПЕРЬ ПОНЯТНО.



В ГРАЖДАНСКОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ  
МНОГО КРУПНЫХ ОБЪЕКТОВ,  
И ЧТОБЫ УВЕЛИЧИТЬ СРОК ИХ СЛУЖБЫ,  
ИСПОЛЬЗОВАЛИ ЖЁСТКИЙ БЕТОН  
ИЗ-ЗА ЕГО БОЛЬШЕЙ ПРОЧНОСТИ  
И ДОЛГОВЕЧНОСТИ.



ВЫ СКАЗАЛИ  
"ИСПОЛЬЗОВАЛИ".  
А ЧТО, СЕЙЧАС ЧТО-ТО  
ИЗМЕНИЛОСЬ?



В ПОСЛЕДНЕЕ ВРЕМЯ, ЧТОБЫ ОБЕСПЕЧИТЬ  
ВЫСОКУЮ СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ, ИСПОЛЬЗУЮТ  
ВСЁ БОЛЬШЕ И БОЛЬШЕ АРМАТУРЫ.  
ПОЭТОМУ ДАЖЕ В ОБЪЕКТАХ ГРАЖДАНСКОГО  
СТРОИТЕЛЬСТВА С БОЛЬШИМ СЕЧЕНИЕМ  
БЫВАЮТ СЛУЧАИ, КОГДА ОПАЛУБКУ  
ТРУДНО ЗАПОЛНИТЬ ЖЁСТКИМ БЕТОНОМ.



СТОЛЬКО ВСЯКИХ  
СЛОЖНОСТЕЙ...

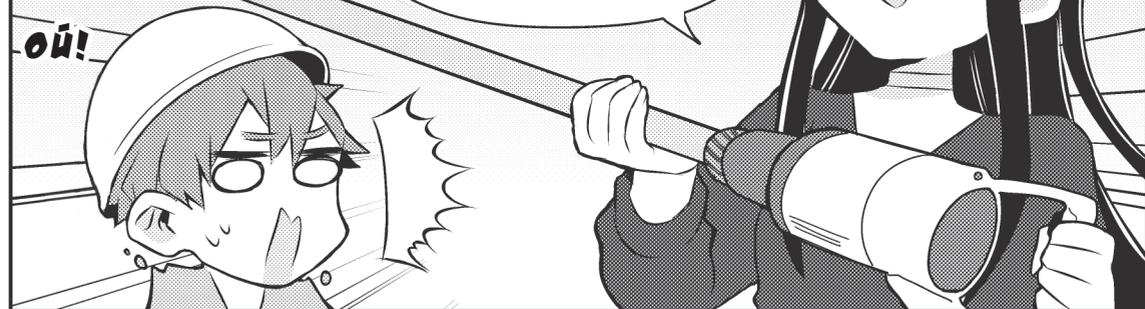
А ПОСЛЕ ПРОХОЖДЕНИЯ  
ПРОВЕРКИ КАЧЕСТВА  
ПЕРЕХОДЯТ УЖЕ К ЗАЛИВКЕ  
БЕТОНА, ВЕРНО?

АГА, А ПОСЛЕ ЗАЛИВКИ  
ИСПОЛЬЗУЮТ ВОТ ТАКОЙ  
МЕХАНИЗМ, НАЗЫВАЮЩИЙСЯ  
СТРОИТЕЛЬНЫЙ ВИБРАТОР,  
ЧТОБЫ СОЗДАТЬ ВИБРАЦИЮ!

**ТА-ДАМ!**

ЗАПОЛНЕНЦЕ ОПАЛУБКИ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИБРАТОРА  
НАЗЫВАЕТСЯ УПЛОТНЕНИЕМ.

оу!



ДЗЗЗЗЗЗ

А ДЛЯ ЧЕГО НУЖНО  
СОЗДАВАТЬ ТАКУЮ  
ВИБРАЦИЮ?

Ого...

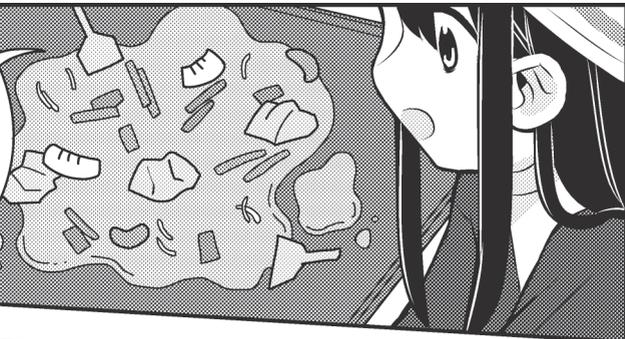
ЗНАЧИТ, БЛАГОДАРЯ  
ЭТОМУ БЕТОН СТАНОВИТСЯ  
ПЛОТНЫМ И ЦЕЛЬНЫМ,  
ДА?

СОЗДАВАЯ ПРАВИЛЬНУЮ ВИБРАЦИЮ,  
МЫ ВЫПУСКАЕМ ИЗ БЕТОНА ЛИШНИЙ ВОЗДУХ,  
И БЕТОННАЯ СМЕСЬ ПРИ ЭТОМ ЛУЧШЕ  
РАСПРЕДЕЛЯЕТСЯ.

ИМЕННО ТАК!



\* Окономияки (японское блюдо) – жареный толстый блин с различными начинками. Мондзя-яки – японское блюдо, похожее на предыдущее, но с тонким тестом. – Прим. перев.



В ТЕСТЕ МОНАЗЬЯ-ЯКИ  
МАЛО МУКИ, ПОЭТОМУ ПРОЧЕ  
ИНГРЕДИЕНТЫ, ВРОДЕ КАПУСТЫ,  
ЛЕГКО ОТДЕЛЯЮТСЯ,  
НЕ ТАК ЛИ?



ОДНАКО ТЕСТО  
ДЛЯ ОКОНОМЦЯКИ ПЛОТНОЕ,  
И ПОЭТОМУ ТЕСТО И НАЧИНКА  
У ОКОНОМЦЯКИ СОЕДИНЯЮТСЯ  
В ЕДИНОЕ ЦЕЛОЕ, И ИНГРЕДИЕНТЫ  
НЕ РАЗВАЛИВАЮТСЯ.



И В САМОМ  
ДЕЛЕ!

ЗНАЧИТ, И В СЛУЧАЕ С БЕТОНОМ,  
ЕСЛИ ПЛОТНОСТЬ ПАСТЫ ВЫСОКАЯ,  
ТО ЗАПОЛНИТЕЛЯМ СТАНОВИТСЯ  
ТРУДНО ТОНУТЬ, И ТАКИМ ОБРАЗОМ  
МЫ МОЖЕМ ЗАЩИТИТЬ БЕТОННУЮ  
СМЕСЬ ОТ РАССЛАИВАНИЯ,  
ВЕРНО?!

ПРАВИЛЬНО.

ОДНАКО  
ОКОНОМЦЯКИ ТРУДНЕЕ  
РАСПРЕДЕЛИТЬ  
ПО ПОВЕРХНОСТИ ПРОТЯВНЯ,  
ПО СРАВНЕНИЮ С МОНАЗЬЯ-ЯКИ.  
АНАЛОГИЧНО И С БЕТОНОМ,  
СТАНОВИТСЯ ТРУДНЕЕ ЕГО  
ЗАЛИВАТЬ.

ВОТ КАК...

УРА!

Урчит в животе

Похоже, она  
проголодалась!



Удобоукладываемость

ПОДВИЖНОСТЬ БЕТОНА НА ПРОФЕССИОНАЛЬНОМ ЯЗЫКЕ НАЗЫВАЕТСЯ **УДОБОУКЛАДЫВАЕМОСТЬ**, И ЕСЛИ УДОБОУКЛАДЫВАЕМОСТЬ СНИЖАЕТСЯ, ТО УСЛОЖНЯЕТСЯ РАБОТА ПО ЗАЛИВКЕ БЕТОНА.

ЗНАЧИТ, ПРИХОДИТСЯ ДУМАТЬ И О ТОМ, ЧТОБЫ ОБЛЕГЧИТЬ РАБОТУ ПО ЗАЛИВКЕ.



С НЕДАВНИХ ПОР СТАЛИ ИСПОЛЬЗОВАТЬ ТАК НАЗЫВАЕМЫЕ **ВОДОРЕДУЦИРУЮЩИЕ ДОБАВКИ**, КОТОРЫЕ РАЗДЕЛЯЮТ ЧАСТИЦЫ ЦЕМЕНТА И ТЕМ САМЫМ ОБЕСПЕЧИВАЮТ **УДОБОУКЛАДЫВАЕМОСТЬ** БЕТОНА ДАЖЕ ПРИ НЕБОЛЬШОМ СОДЕРЖАНИИ ВОДЫ.

ЭЭЭ... ЗНАЧИТ, И ПРОБЛЕМА РАССЛАИВАНИЯ БЕТОННОЙ СМЕСИ, И ПРОБЛЕМА **УДОБОУКЛАДЫВАЕМОСТИ** БЕТОНА ВПОЛНЕ РЕШАЕМЫ!



ВЕРНО.

БОЛЕЕ ТОГО, БЫЛ РАЗРАБОТАН ТАК НАЗЫВАЕМЫЙ **САМОУПЛОТНЯЮЩИЙСЯ БЕТОН**, С ВЫСОКОЙ **УДОБОУКЛАДЫВАЕМОСТЬЮ**, БЕТОННАЯ СМЕСЬ КОТОРОГО НЕ РАССЛАИВАЕТСЯ!

ТАКОЙ БЕТОН НЕ НУЖНО УПЛОТНЯТЬ, ЭТОТ ПОТРЕЯЮЩИЙ МАТЕРИАЛ ПОД СВОЕЙ СОБСТВЕННОЙ ТЯЖЕСТИ ЗАПОЛНЯЕТ КАЖДЫЙ УГОЛОК ОПАЛУБКИ!

Самоуплотняющийся бетон

### 3.2. МЕХАНИЗМ РЕАКЦИИ ГИДРАТАЦИИ

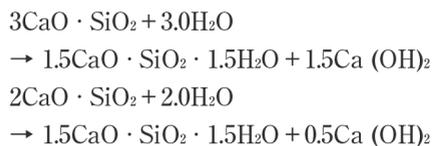


КАК Я УЖЕ РАССКАЗЫВАЛА  
РАНЬШЕ, ЗАЛТЫЙ БЕТОН  
ТВЕРДЕЕТ В РЕЗУЛЬТАТЕ  
РЕАКЦИИ ГИДРАТАЦИИ.

ЭТО О ТОМ, ЧТО  
БЕТОН ТВЕРДЕЕТ  
НЕ ПОТОМУ, ЧТО  
ВЫСЫХАЕТ, ДА?

КОГДА ВОДА КОНТАКТИРУЕТ С ЦЕМЕНТОМ,  
ПРОИСХОДИТ ХИМИЧЕСКАЯ РЕАКЦИЯ,  
НАЗЫВАЕМАЯ **РЕАКЦИЕЙ ГИДРАТАЦИИ**.  
ЕСЛИ РАССМОТРЕТЬ ЕЁ ПОДРОБНЕЕ, ТО ГЛАВНЫМ  
ОБРАЗОМ В РЕАКЦИЮ ВСТУПАЮТ СИЛКАТЫ  
КАЛЬЦИЯ С ВОДОЙ, В РЕЗУЛЬТАТЕ ЧЕГО  
ОБРАЗУЮТСЯ ПРОДУКТЫ ГИДРАТАЦИИ,  
НАЗЫВАЕМЫЕ **ГЕЛЬ С-С-Н**  
И **ГИДРОКСИД КАЛЬЦИЯ**.

РАЗ ПРОИСХОДИТ  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ  
С ВОДОЙ, ЗНАЧИТ, КАКОЕ  
ТАМ "ВЫСЫХАНИЕ",  
ПОЛУЧАЕТСЯ НАОБОРОТ -  
"УВЛАЖНЕНИЕ",  
ВЕРНО?





ТУСК

Увлажнение.

ИМЕННО!

ЧТОБЫ ПРОТЕКАЛА РЕАКЦИЯ ГИДРАТАЦИИ, ВАЖНО УДЕРЖИВАТЬ ВОДУ В БЕТОНЕ!

ПРОЦЕСС ГИДРАТАЦИИ В ЗАЛИТОМ БЕТОНЕ, ПРОИСХОДЯЩИЙ ПРИ УДЕРЖИВАНИИ ВОДЫ В БЕТОНЕ ИЛИ ПРИ ПОДАЧЕ ВОДЫ СНАРУЖИ, НАЗЫВАЕТСЯ **ВЫДЕРЖКОЙ**.



ПОЭТОМУ ЗАЛИТЫЙ БЕТОН ИНОГДА ЧЕМ-НИБУДЬ НАКРЫВАЮТ? ЧТОБЫ ОБЕСПЕЧИТЬ ВЫДЕРЖКУ БЕТОНА И НЕ ДОПУСТИТЬ ЕГО ВЫСЫХАНИЯ?



ВЕРНО. КРОМЕ ТОГО, БЕТОН СМАЧИВАЮТ, НЕ СНИМАЯ ОПАЛУБКИ, ИЛИ НАКРЫВАЮТ ПОВЕРХНОСТЬ СПЕЦИАЛЬНОЙ ПЛЁНКОЙ. ТАКИЕ МЕРЫ ЗАЩИЩАЮТ БЕТОН ОТ ВЫСЫХАНИЯ.

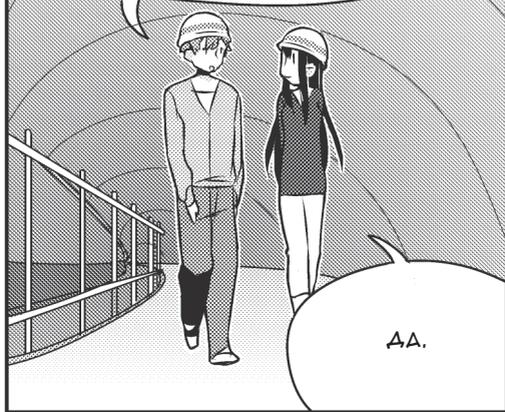


ВЫДЕРЖКА - ЭТО ОЧЕНЬ ВАЖНЫЙ ПРОЦЕСС, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЙ ПРОЧНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ БЕТОНА!

Поняла?

Понял, понял!

ЗНАЧИТ, БЕТОН СРАЗУ  
НЕ ТВЕРДЕЕТ, ПОТОМУ  
ЧТО РЕАКЦИЯ НЕ ПРОИСХОДИТ  
МГНОВЕННО?



ДА.

ПРИ СМЕШИВАНИИ ЦЕМЕНТА С ВОДОЙ  
ИЗ ЦЕМЕНТА ВЫДЕЛЯЕТСЯ КАЛЬЦИЙ,  
ЧТО ЯВЛЯЕТСЯ ПОДГОТОВИТЕЛЬНОЙ СТАДИЕЙ  
ДЛЯ РЕАКЦИИ. ЭТО ЗАНИМАЕТ ПЕРИОД  
ВРЕМЕНИ, НАЗЫВАЕМЫЙ

ИНДУКЦИОННЫМ  
И ДЛЯЩИЙСЯ  
НЕСКОЛЬКО ЧАСОВ,  
В ТЕЧЕНИЕ  
КОТОРОГО БЕТОН  
НЕ ЗАТВЕРДЕВАЕТ.

Индукционный  
период



ТО ЕСТЬ РАБОТА  
ДОЛЖНА БЫТЬ СДЕЛАНА  
В ТЕЧЕНИЕ ИНДУКЦИОННОГО  
ПЕРИОДА, ДА?



ЧЕРЕЗ НЕСКОЛЬКО ЧАСОВ  
РЕАКЦИЯ АКТИВИЗИРУЕТСЯ,  
И С ВЫДЕЛЕНИЕМ ТЕПЛА  
НАЧИНАЕТСЯ ЗАТВЕРДЕВАНИЕ.

КСТАТИ ГОВОРЯ,  
СКОРОСТЬ РЕАКЦИИ МОЖЕТ  
БЫТЬ РАЗНОЙ, ОНА ЗАВИСИТ  
ОТ СООТНОШЕНИЯ ХИМИЧЕСКИХ  
Веществ, СОДЕРЖАЩИХСЯ  
В ЦЕМЕНТЕ.

ВОТ ОНО ЧТО!





ОБЪЯСНЮ ПОДРОБНЕЕ.

ХИМИЧЕСКИЕ ВЕЩЕСТВА, СОСТАВЛЯЮЩИЕ ЦЕМЕНТ, ИЛИ ТАК НАЗЫВАЕМЫЙ МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЦЕМЕНТА, - ЭТО СЛЕДУЮЩИЕ ЧЕТЫРЕ ВИДА МИНЕРАЛОВ: АЛИТ ( $C_3S$ ), БЕЛИТ ( $C_2S$ ), АЛЮМИНАТ ( $C_3A$ ) И АЛЮМОФЕРРИТ ( $C_4AF$ ).

$C_3S$

$C_4AF$

$C_3A$

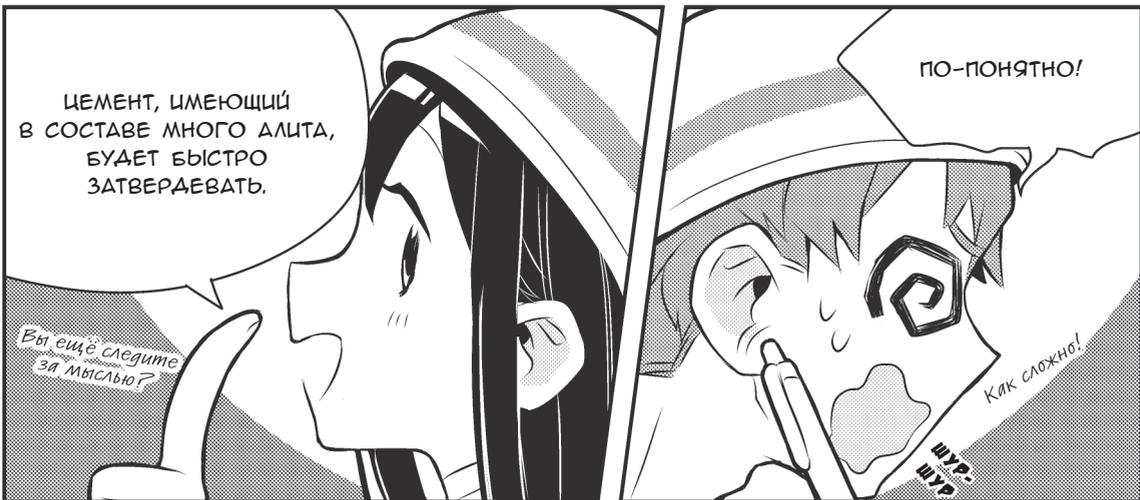
$C_2S$

В разделе химии, посвящённом цементу, используются следующие обозначения: С - CaO, S - SiO<sub>2</sub>, А - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, F - Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.



АЛИТ И БЕЛИТ - ОСНОВНЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ ЦЕМЕНТА. В СОВОКУПНОСТИ ОНИ ЗАНИМАЮТ 70-80 % ОБЩЕГО СОСТАВА.

УГУ-УГУ...



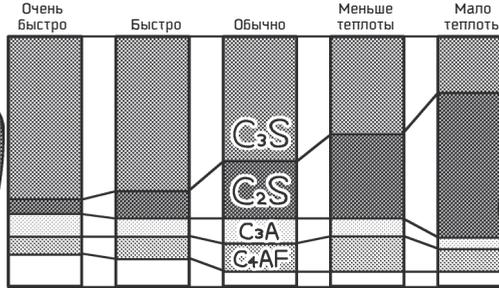
ЦЕМЕНТ, ИМЕЮЩИЙ В СОСТАВЕ МНОГО АЛИТА, БУДЕТ БЫСТРО ЗАТВЕРДЕВАТЬ.

ПО-ПОНЯТНО!

Вы ещё следите за мыслью?

Как сложно!

БЕЛИТ ЖЕ, НАПРОТИВ,  
ВСТУПАЕТ В РЕАКЦИЮ СЛАБЕЕ,  
ПОЭТОМУ ПОВЫШЕННОЕ СОДЕРЖАНИЕ  
БЕЛИТА ПОЗВОЛЯЕТ УМЕНЬШАТЬ  
ВЫДЕЛЯЕМУЮ ПРИ ГИДРАТАЦИИ  
ТЕПЛОТУ.



ПОЛУЧАЕТСЯ,  
ЕСЛИ ИЗМЕНИТЬ  
СООТНОШЕНИЕ  
МИНЕРАЛЬНЫХ  
СОСТАВЛЯЮЩИХ, ПОЛУЧИМ  
ЦЕМЕНТ С ДРУГИМИ  
СВОЙСТВАМИ!

**БЖЖЖЖЖЖЖЖЖЖ**



ХМ...  
КАЖЕТСЯ, ЭТО ЗВУК  
КАКОГО-ТО МЕХАНИЗМА!



ТАМ ЖЕ КОНЕЦ  
ТОННЕЛЯ!  
ВИДИМО,  
СЕЙЧАС КАК РАЗ

ПРОДОЛЖАЮТСЯ  
РАБОТЫ ПО  
ПРОКЛАДЫВАНИЮ  
ТОННЕЛЯ!



НАМ УЖАСНО  
ПОВЕЗЛО, ЧТО МЫ  
СМОЖЕМ ПОСМОТРЕТЬ  
РАБОТУ ТОННЕЛЕПРО-  
ХОДЧЕСКОЙ МАШИНЫ!!!

**БЖЖЖ**

**БЖЖЖ**



## ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

### Свойства свежей бетонной смеси и бетонные работы

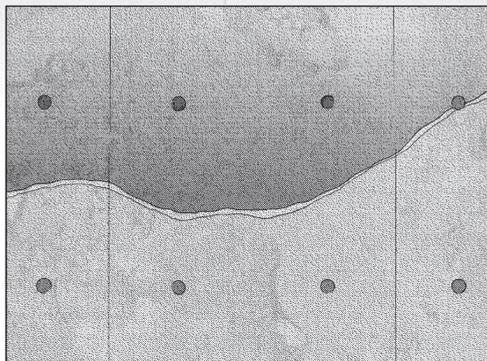
Полученный сразу после смешивания воды, цемента и заполнителей бетон ещё подвижен и может легко менять свою форму. Бетон в этом состоянии называется **свежей бетонной смесью**. Свойства свежей бетонной смеси меняются ежеминутно, и это зависит от марки бетона, типа используемых компонентов, температуры окружающей среды и прочих факторов. Чтобы получилось прочное и долгосрочное строение, очень важно тщательно и аккуратно подойти к работе с бетоном. Поэтому выбор подходящих материалов и состава (марки) бетона, понимание свойств свежей бетонной смеси и основанное на этом понимании тщательное планирование работ с бетоном – всё это крайне важные моменты.

Бетонные работы включают в себя следующие работы по порядку: производство бетона, транспортировка, заливка, уплотнение, отделка и выдержка. После смешивания компонентов бетон на протяжении нескольких часов остаётся подвижным и не затвердевает. На улицах города иногда можно видеть автобетоносмесители, которые перевозят свежую бетонную смесь. Однако эти машины могут, например, попасть в дорожную пробку, что может привести к задержке доставки, и это создаёт проблемы. Так как по прошествии некоторого времени после смешивания компонентов свойства бетона начинают меняться. Именно поэтому бетонные заводы есть повсеместно в каждом регионе страны, чтобы бетон можно было быстро доставить на любые строительные площадки. Согласно изданию «Стандартная спецификация бетона (строительство)»<sup>1</sup>, допустимое время после перемешивания до заливки бетона при температуре ниже 25 °С – 2 ч, а при температуре выше 25 °С – 1,5 ч.

Работы по распределению бетона внутри опалубки называются **заливкой**. Чтобы получить однородный бетон, при заливке используют строительный вибратор, который необходим для уплотнения бетона. В основном при заливке первый слой бетона составляет 40–50 см в высоту, заливка продолжается непрерывно. Если после заливки одного слоя какое-то время подождать, прежде чем заливать следующий слой, то на стыке слоёв может образоваться так называемый **рабочий шов** (рис. 3.1). Он означает нарушение целостности бетона вследствие того, что верхний слой бетона был залит после того, как нижний слой начал затвердевать. Чтобы избежать образования рабочих швов, установлен допустимый временной интервал между заливками слоёв. Этот интервал означает промежуток времени после заливки и уплотнения нижнего слоя бетона, в течение которого необходимо залить следующий слой. Допустимый ин-

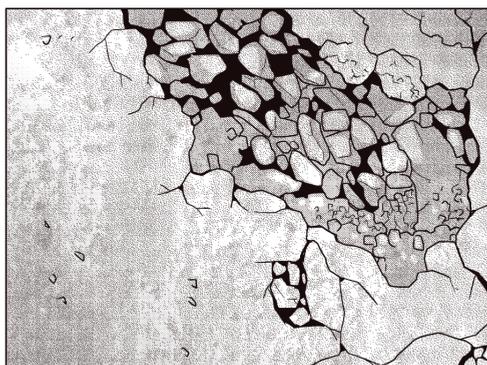
<sup>1</sup> Научное общество гражданского строительства Японии. Стандартная спецификация бетона (строительство). 2007.

тервал составляет 2,5 ч при температуре воздуха ниже 25 °С и 2 ч при температуре воздуха выше 25 °С.



*Рис. 3.1. Пример рабочего шва*

Уплотнение бетона проводят для того, чтобы распределить бетон равномерно по всей опалубке. Тщательно проведённое уплотнение обеспечивает качественный бетон и потому чрезвычайно важно. Самым распространенным является глубинный строительный вибратор, который погружается в залитый бетон, но иногда для уплотнения используют ещё и внешние вибраторы, называемые ещё **опалубочными**, которые устанавливаются на опалубку. Если уплотнение проведено недостаточно хорошо, это может стать причиной для образования в бетоне каверн (рис. 3.2).



*Рис. 3.2. Пример каверны бетона*

Чтобы правильно проходила реакция гидратации, необходимо обеспечить выдержку бетона. Для того чтобы гидратация шла непрерывно, что позволит получить на выходе прочный и долговечный бетон, крайне важно поддерживать определённую влажность. Поэтому, чтобы защитить бетон от высыхания,

уберечь от прямого солнечного света и ветра, его укрывают специальными влажными матами или подбием одеял. Или же через определённые промежутки времени бетон сбрызгивают либо поливают водой. Такими мерами и поддерживается необходимый уровень увлажнённости бетона.

## Осадка бетона

Осадка бетона выражает сопротивляемость бетонной смеси трансформации, или ещё это называют **консистенцией бетона**. Традиционно в гражданском строительстве используют бетон с осадкой конуса 8 см, а в архитектуре – бетон с осадкой конуса 12 см. Когда используется бетон с большей осадкой конуса, то, так как такой бетон более подвижен, легче осуществляется его заливка. Однако в общем случае бетон с более высокой осадкой конуса подразумевает более высокое содержание воды в своём составе, что с точки зрения долговечности бетона не очень хорошо. Поэтому значения осадки конуса 8 и 12 см были установлены как обеспечивающие удовлетворительный баланс обрабатываемости, долговечности и экономичности бетона.

Однако в последние годы меняются внешние условия и, соответственно, требования к бетонным сооружениям. Например, после великого землетрясения Хансин-Авадзи на юге префектуры Хёго, случившегося в 1995 году, стало очень важным обеспечить бетонным сооружениям высокую сейсмостойкость. По сравнению с более ранними постройками, стали использовать больше стальных материалов, чтобы обеспечить бетонным сооружениям большую сопротивляемость. Так, на рис. 3.3 приведён пример арматурного каркаса строения, и как можно видеть, плотность арматурных стержней очень высокая. В подобных случаях бетонные работы с использованием стандартной бетонной смеси усложняются. А если ещё принять во внимание необходимость быстро осуществлять бетонные работы, то использование жёсткого бетона с осадкой конуса 8 см становится трудновыполнимым.

Кроме того, становится всё труднее получать натуральные заполнители хорошего качества, так что ситуация с обеспеченностью компонентами тоже меняется. Так, чтобы получить осадку конуса 8 см, в регионах, где ситуация с заполнителями не очень хорошая, приходится увеличивать количество воды в составе бетона. Получается, что для получения бетона с одинаковой прочностью и осадкой конуса в разных регионах используют разное количество воды. А разное количество воды в составе бетона означает, что и усадка при высыхании, скорость нейтрализации и сопротивляемость проникновению соли будут отличаться.

Но благодаря появившимся высокоэффективным водоредуцирующим добавкам стало возможным увеличение долговечности и подвижности (увеличение осадки конуса) бетона без увеличения количества воды в составе. Используя новые высокоэффективные водоредуцирующие добавки и с учётом используе-

мых заполнителей и разновидности цемента можно создавать бетон, подходящий под конкретные объекты и конкретные условия. Так благодаря новым разработкам увеличиваются возможности по созданию бетона, в котором сбалансированы различные свойства, такие как обрабатываемость, долговечность, экономичность, механические свойства и т. д.

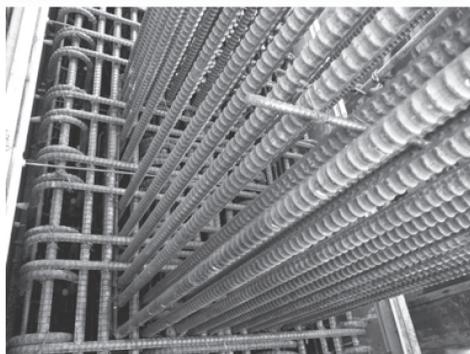


Рис. 3.3. Пример арматурного каркаса

## Обрабатываемость бетона

Важной характеристикой свежей бетонной смеси является её обрабатываемость. Обрабатываемость показывает, насколько легко или сложно осуществлять бетонные работы с данной смесью, и влияет на транспортировку, заливку, уплотнение и отделку бетона. Согласно изданию «Стандартная спецификация бетона (строительство)»<sup>1</sup> обрабатываемость определяется удобоукладываемостью, прокачиваемостью и связностью свежей бетонной смеси.

Удобоукладываемость означает свойство бетонной смеси после уплотнения вибратором плотно и в полном объёме заполнять форму, проходить между стержнями арматуры, при этом не расслаиваясь. Удобоукладываемость определяется **подвижностью бетонной смеси** и **сопротивляемостью расслоению** при вибрационном уплотнении. Подобно тому, как это показано на рис. 3.4, можно определить, хорошая или плохая удобоукладываемость бетонной смеси, исходя из баланса подвижности и сопротивляемости расслоению.

Подвижность бетона в общем случае определяется осадкой конуса. То есть чем больше осадка конуса, тем мягче и подвижнее бетонная смесь. Соответственно, чем меньше осадка конуса, тем бетонная смесь более жёсткая и менее подвижная. Если же в случае с жёстким бетоном увеличить количество воды в составе, что приведёт к увеличению осадки конуса, то цементная паста станет

<sup>1</sup> Научное общество гражданского строительства Японии. Стандартная спецификация бетона (строительство). 2007.

менее вязкой, что, в свою очередь, увеличит вероятность расслоения бетонной смеси. Таким образом, с точки зрения удобоукладываемости, увеличение осадки конуса хорошо для подвижности, но плохо для сопротивляемости расслоению. Другими словами, как показано на рис. 3.4, чтобы найти необходимый уровень удобоукладываемости, нужно установить осадку конуса.

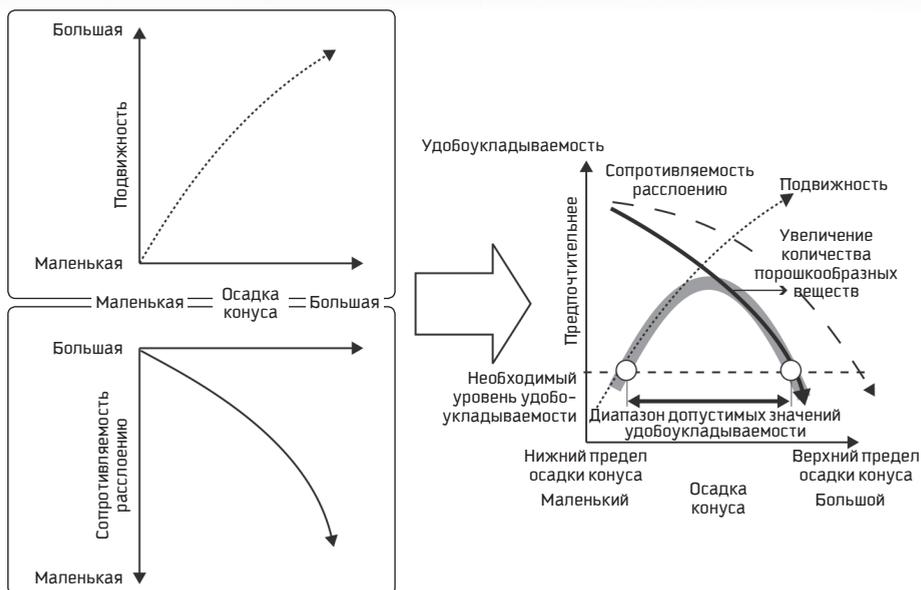


Рис. 3.4. Концепция определения удобоукладываемости

Если условия строительства сложные, например сложный арматурный каркас или строение в сечении имеет непростую форму, то в таких случаях увеличивают удобоукладываемость бетона. То есть необходимо увеличить диапазон допустимых значений удобоукладываемости. Но как это сделать? Как было упомянуто в манге, чтобы из мондзя-яки, которые легко расслаиваются, получить оконмияки, которые хорошо держат форму, нужно изменить рецепт. Другими словами, если увеличить количество цемента, то, подобно муке в оконмияки, это послужит увеличением сопротивляемости расслоению. Возрастает вязкость цемента, и таким образом снизится расслаиваемость. Правда, с увеличением количества цемента появляется другой источник беспокойства – риск растрескивания из-за увеличения тепла, выделяемого при гидратации. Поэтому тут уместно добавлять вещества с низкой теплотворной способностью вроде летучей золы, мелкого доменного шлака или порошкообразные вещества, практически не участвующие в гидратации, вроде мелкого известкового порошка. Проясним здесь разницу в понятиях «цемент», «связующее вещество» и «порошкообразное вещество». Под цементом подразумевается портландце-

мент или смешанный цемент. Связующее вещество – это добавки к цементу, вроде летучей золы или доменного шлака, которые участвуют в гидратации. А порошкообразные вещества – это неактивные добавки (не влияют на гидратацию), например известковый порошок.

## Самоуплотняющийся бетон

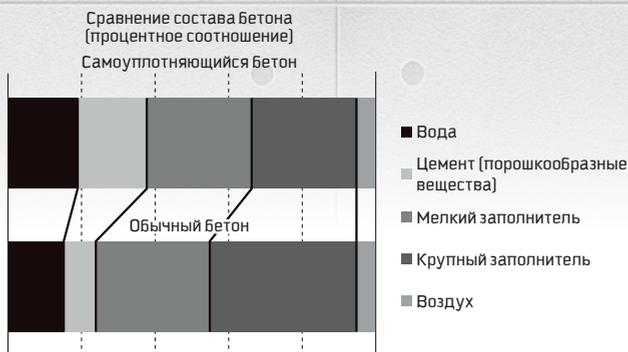
В 1988 году в Токийском университете на кафедре гражданского строительства инженерного факультета в лаборатории, занимавшейся исследованием бетона, профессорами Окамура Хадзуме, Маекава Коичи и Кадзумаса Одзава был создан революционно новый бетон, названный **самоуплотняющимся бетоном**<sup>1</sup>. Этот замечательный бетон обладает одновременно большой подвижностью и высокой сопротивляемостью расслоению, и его не нужно уплотнять, так как он под своей собственной тяжестью полностью заполняет форму.

Мотивом для создания самоуплотняющегося бетона послужило быстрое разрушение бетонных строений, с которым столкнулось общество в 1980-е годы. Актуальной стала проблема изнашивания строений, которым не было и 20 лет, всё чаще возникала необходимость ремонта, это повлияло на активизацию исследований в области увеличения срока службы бетонных строений. Одними из причин быстрого разрушения бетонных строений являются ошибки во время строительных работ. Поэтому профессор Окамура начал разрабатывать бетон, качество которого не зависило бы от качества строительных работ и в особенности не зависило бы от такого влиятельного фактора, как уплотнение бетона.

Как уже было упомянуто раньше, хорошая удобоукладываемость бетона определяется не только его высокой подвижностью, но и хорошей сопротивляемостью расслаиванию. Это важно для того, чтобы во время заливки бетона не образовывались закупорки крупными заполнителями в местах, где бетонная смесь встречает препятствия, например арматурные стержни. Чтобы обеспечить бетону высокую подвижность и хорошую сопротивляемость расслаиванию, в составе самоуплотняющегося бетона используется больше мелких порошкообразных составляющих и меньше крупных заполнителей, по сравнению с обычным бетоном (см. рис. 3.5). Порошкообразные вещества увеличивают вязкость бетонной пасты, поэтому их содержание увеличивают, а чтобы уменьшить частоту столкновения между собой крупных заполнителей, их количество уменьшают, по сравнению с составом обычного бетона. Наряду с увеличением порошкообразных веществ добавляют также высокоэффективные водоредуцирующие добавки, иногда для увеличения вязкости используют ещё и загустители.

---

<sup>1</sup> Окамура Хадзуме, Маекава Коичи, Кадзумаса Одзава. Высокопрочный бетон. 1993.

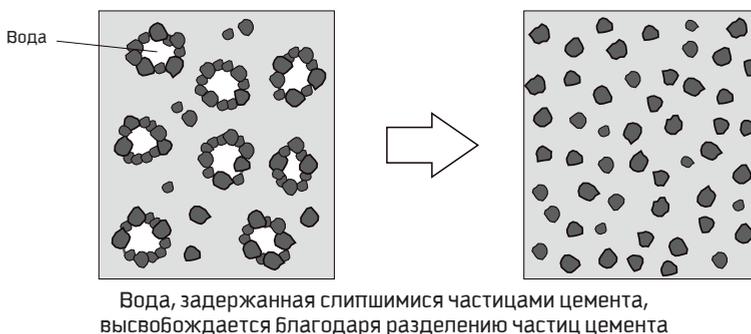


*Рис. 3.5. Сравнение состава бетона*

## Высокоэффективные водоредуцирующие добавки

Чтобы самоуплотняющийся бетон получился высокоподвижным, очень важно использовать высокоэффективные водоредуцирующие добавки. Высокоэффективные водоредуцирующие добавки делятся на несколько типов в зависимости от основного ингредиента. Здесь мы рассмотрим два вида: с содержанием нафталинсульфоновой кислоты и с содержанием поликарбоновой кислоты. Предшествовала появлению современных высокоэффективных водоредуцирующих добавок разработанная в 1962 году профессором Хаттори Кеничи нафталинсульфоновая водоредуцирующая добавка.

Задача высокоэффективных водоредуцирующих добавок – разделять частицы цемента. Когда цемент смешивается с водой, частицы цемента слипаются и группируются вокруг частиц воды, задерживая их. Таким образом, воды, необходимой для обеспечения подвижности бетонной смеси, становится меньше (рис. 3.6). Если же разделить частицы цемента, то вода, задерживаемая слипшимися частицами цемента, освободится, что позволит обеспечить высокую подвижность бетонной смеси даже при небольшом содержании воды.



*Рис. 3.6. Роль высокоэффективных водоредуцирующих добавок*

Механизм разделения частиц цемента объясняется электростатическим отталкиванием и стерическим эффектом (рис. 3.7). Частицы цемента имеют положительный заряд, а водоредуцирующие добавки, имеющие отрицательный заряд, притягиваются к поверхности частиц цемента, образуя заряженный слой, что приводит к отталкиванию частиц друг от друга. Вследствие чего частицы цемента разделяются. Содержащие нафталинсульфоновую кислоту высокоэффективные водоредуцирующие добавки разделяют частицы цемента вследствие электростатического отталкивания. С другой стороны, в случае с поликарбоновой кислотой разделение происходит вследствие химической структуры самой водоредуцирующей добавки. В то время как в случае нафталинсульфоновой кислоты разделение происходит из-за электрической работы, с похожей на цепь химической структурой добавки с поликарбоновой кислотой возникает стерический эффект, который и приводит к разделению частиц цемента.

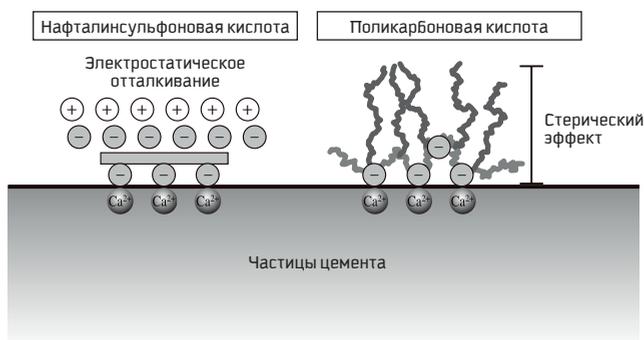


Рис. 3.7. Механизм действия высокоэффективных водоредуцирующих добавок

## Гидратация цемента

Когда цемент начинает контактировать с водой, начинается реакция с выделением теплоты. Получаемые в результате реакции вещества содержат воду и называются гидроксидами, а сама реакция называется реакцией гидратации. Как проходит реакция гидратации, можно определить, измерив количество выделяемой при этом теплоты. На рис. 3.8 схематично показано изменение скорости выделения теплоты. Сразу после контакта цемента с водой в течение короткого промежутка времени происходит быстрая экзотермическая реакция. Затем, в течение периода времени, называемого **индукционным периодом**, реакция стагнирует. Благодаря тому что индукционный период длится несколько часов, бетон сразу не затвердевает, что даёт время для осуществления бетонных работ. После индукционного периода реакция активизируется, и скорость выде-

ления теплоты резко возрастает, этот период называется **периодом ускорения**. Достигнув пикового значения, реакция постепенно замедляется.



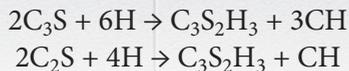
*Рис. 3.8. Выделение теплоты при гидратации портландцемента*

Химические вещества, входящие в состав портландцемента, или так называемый его **минералогический состав**, – это следующие четыре вида минералов: алит ( $C_3S$ ), белит ( $C_2S$ ), алюминат ( $C_3A$ ) и алюмоферрит ( $C_4AF$ ). В разделе химии, посвященном цементу, используются следующие обозначения: С –  $CaO$ ; S –  $SiO_2$ ; А –  $Al_2O_3$ ; F –  $Fe_2O_3$ . Отличительные особенности каждого элемента отображены в табл. 3.1. Алит и белит – основные составляющие портландцемента. В совокупности они занимают 70–80 % общего состава. Если реакция гидратации протекает с меньшим выделением теплоты, значит, в таком портландцементе содержится больше белита, обладающего свойством замедлять реакцию гидратации. Алюминат и алюмоферрит называют промежуточными минералами, потому что если посмотреть на состав портландцемента в поляризационный микроскоп, то можно видеть, что они как бы заполняют промежутки между алитом и белитом. То, что сразу после контакта цемента с водой мгновенно происходит реакция с большим выделением теплоты, – заслуга алюмината. Чтобы взять такую быструю реакцию под контроль, в портландцемент добавляют гипс.

**Таблица 3.1. Свойства минералов**

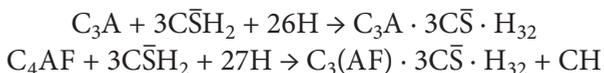
	Алит ( $C_3S$ )	Белит ( $C_2S$ )	Алюминат ( $C_3A$ )	Алюмоферрит ( $C_4AF$ )
Количество выделяемой теплоты (ккал/г)	120	62	207	100
Скорость гидратации	Быстрая	Медленная	Очень быстрая	Быстрая
Обычный портландцемент	50–60 %	15–25 %	Менее 10 %	Менее 10 %
Низкотермичный портландцемент	15–25 %	40–60 %	Менее 5 %	Менее 5 %

Гидратация алита и белита выражается следующими химическими формулами:



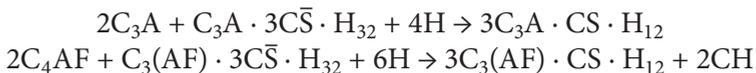
CH здесь означает гидроксид кальция  $Ca(OH)_2$ . Другими словами, в результате реакции алита и белита получаются гидросиликаты кальция (C-S-H) и гидроксид кальция. Гидроксид кальция – это кристаллическое вещество, в то время как гидросиликат кальция – это малокристаллическое вещество вследствие того, что пропорции  $CaO$ ,  $SiO_2$  и  $H_2O$  в его составе меняются при изменении условий реакции. Так как гидросиликат кальция не имеет фиксированного химического состава, в общем случае его называют **C-S-H**, или **гель C-S-H**.

Далее представлены химические реакции алюмината и алюмоферрита. Так как в цементе содержится двухводный сульфат кальция (гипс), он реагирует с водой и образует призматические кристаллы, называемые этtringит.



Здесь S означает  $SO_3$ .

Когда весь двухводный сульфат кальция вступит в реакцию, оставшийся минерал начнет вступать в реакцию с этtringитом, превращаясь в моносulfат.



Про гель C-S-H, этtringит и прочие элементы гидратации подробнее пойдёт речь в главе 4.

## Зависимость гидратации от температуры

Скорость реакции гидратации сильно зависит от температуры. Другими словами, при росте температуры скорость реакции гидратации тоже возрастает. Реакция гидратации цемента экзотермическая, поэтому температура возрастает, вследствие чего реакция еще больше активизируется, а значит, выделяемое тепло тоже ещё больше увеличивается, таким образом, скорость гидратации тоже растёт. Если во время заливки цемента внешняя температура высокая или если поперечное сечение конструкции велико, что способствует накоплению тепла внутри конструкции, то высок риск образования термических трещин при реакции гидратации. Подробнее о термических трещинах поговорим в главе 4.

Не только реакция гидратации цемента, но и в целом скорость химических реакций подчиняется закону Аррениуса. Прежде всего в химических реакци-

ях, чтобы из элементов  $A + B$  получился элемент  $AB$ , необходимо, чтобы был преодолён определённый энергетический барьер (рис. 3.9). Энергия, необходимая, чтобы молекулы веществ начали друг с другом реагировать, называется **энергией активации**. Когда возникает химическая реакция, молекулы участвующих в реакции веществ сталкиваются между собой. И тогда молекулы, обладающие кинетической энергией, большей, чем энергия активации, принимают участие в реакции. Кинетическая энергия молекул может быть описана с помощью распределения Больцмана (рис. 3.10). Как показано на рисунке, при повышении температуры количество молекул, обладающих большей энергией, увеличивается экспоненциально, а следом увеличивается и скорость реакции. Исходя из этого, Аррениус вывел следующую зависимость между скоростью реакции  $k$  и температурой  $T$ :

$$k = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right).$$

Здесь  $A$  – константа (фактор частоты);  $E$  – энергия активации;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – абсолютная температура. Если записать предыдущее уравнение с использованием натурального логарифма, то получим:

$$\ln(k) = -\frac{E}{RT} + \ln(A).$$

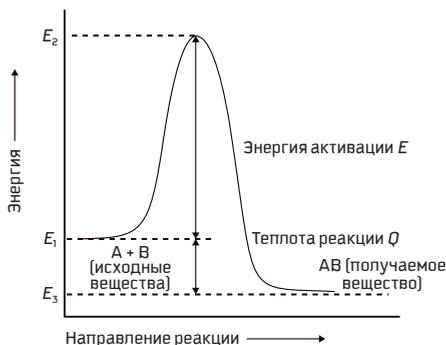


Рис. 3.9. Химическая реакция и энергия активации

Получается линейное уравнение, поэтому если на графике по горизонтальной оси отложить обратные значения температуры  $T$ , а по вертикальной оси отложить натуральный логарифм скорости реакции  $k$ , то увидим их линейную взаимосвязь (рис. 3.11). Этот график называется **графиком Аррениуса**. Наклон полученной прямой равен  $-E/R$ , так что отсюда можно вычислить и энергию активации  $E$  для химической реакции.

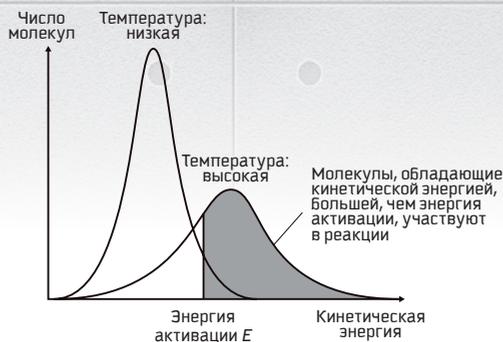


Рис. 3.10. Кинетическая энергия молекул и протекание химической реакции



Рис. 3.11. График Аррениуса

Портландцемент не простое химическое соединение, он состоит из смеси сложных минеральных веществ, поэтому не может быть выражен через одно уравнение с одной константой и с одним значением энергии активации. Однако если сделать расчёты, основанные на уравнении Аррениуса, для каждого из минеральных веществ по отдельности, то можно создать обобщённую модель прогнозирования скорости выделения теплоты при реакции гидратации цемента<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Koichi Maekawa, Tetsuya Ishida, Toshiharu Kishi. Multi-scale modeling of structural concrete. Taylor and Francis, 2009.

## ГЛАВА 4

# СОЗРЕВАНИЕ БЕТОНА. ДЕФЕКТЫ НА НАЧАЛЬНОМ ЭТАПЕ



УХ ТЫ! ЗАОРОВО,  
ЗАОРОВО, ЗАОРОВО!!

В САМОМ ДЕЛЕ,  
ГРАНДИОЗНО!

В ТОТ ДЕНЬ МЫ ПОСЕТИЛИ ПЛОТИНУ  
МИЯГАСЭ В ПРЕФЕКТУРЕ КАНАГАВА.

ВЫСОТА ПЛОТИНЫ -  
156 МЕТРОВ,  
ОБЪЁМ ВОДЫ В ХРАНИЛИЩЕ -  
300 МИЛЛИОНОВ КУБОМЕТРОВ.

НЕ ЗРЯ ЭТО САМАЯ БОЛЬШАЯ  
ПЛОТИНА В КАНТО\*!

\* Канто - регион в Японии.

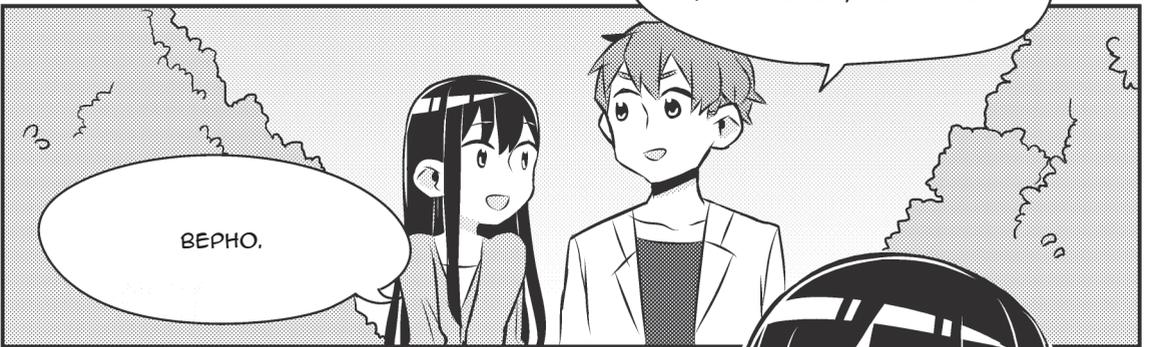


ПРИ ВОЗВЕДЕНИИ ПЛОТИНЫ  
МЯГАСЭ БЫЛО ИСПОЛЬЗОВАНО  
ОГРОМНОЕ КОЛИЧЕСТВО БЕТОНА, И ЭТО  
ОДНА ИЗ ГРАВИТАЦИОННЫХ БЕТОННЫХ  
ПЛОТИН, ТО ЕСТЬ ТАКИХ ПЛОТИН, КОТОРЫЕ  
СОПРОТИВЛЯЮТСЯ ДАВЛЕНИЮ ВОДЫ  
СВОЕЙ СОБСТВЕННОЙ МАССОЙ,  
ВЕРНО?

ДА!

ЭТО САМЫЙ  
НАДЕЖНЫЙ ВИД ПЛОТИН,  
ОНИ МОГУТ ВЫДЕРЖАТЬ  
ДАЖЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ  
И НАВОДНЕНИЯ.

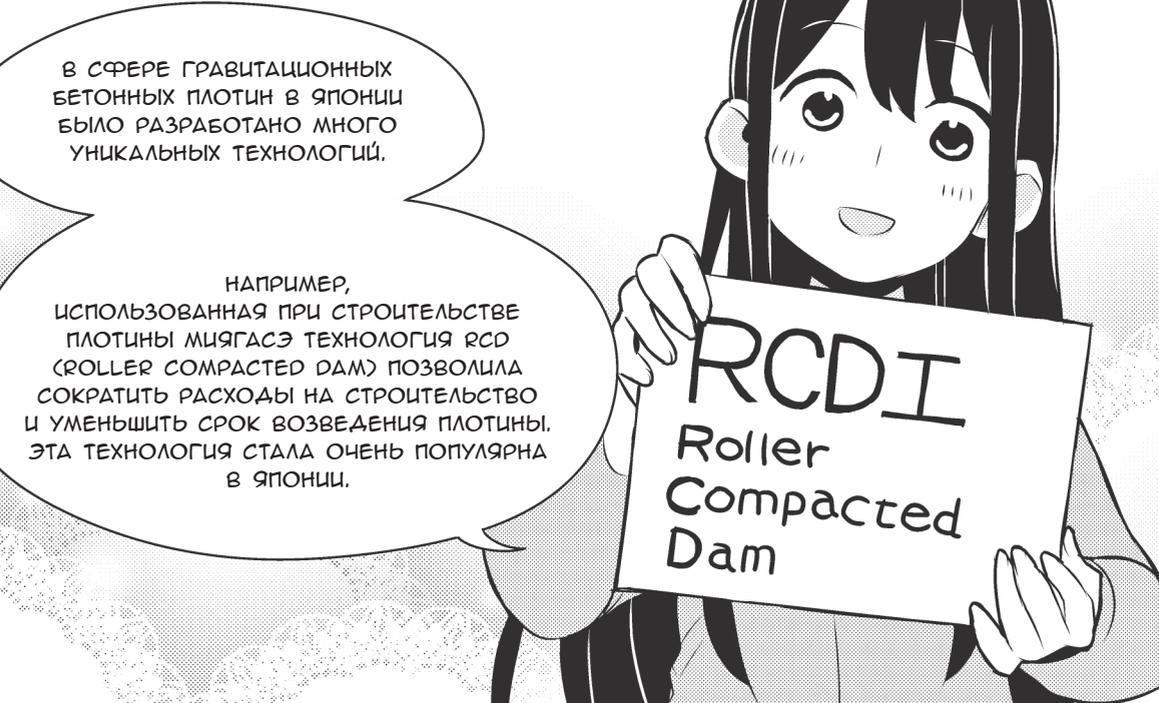
САМЫЙ ПОДХОДЯЩИЙ ВИД  
ДЛЯ ЯПОНИИ, НЕ ТАК ЛИ?



ВЕРНО.

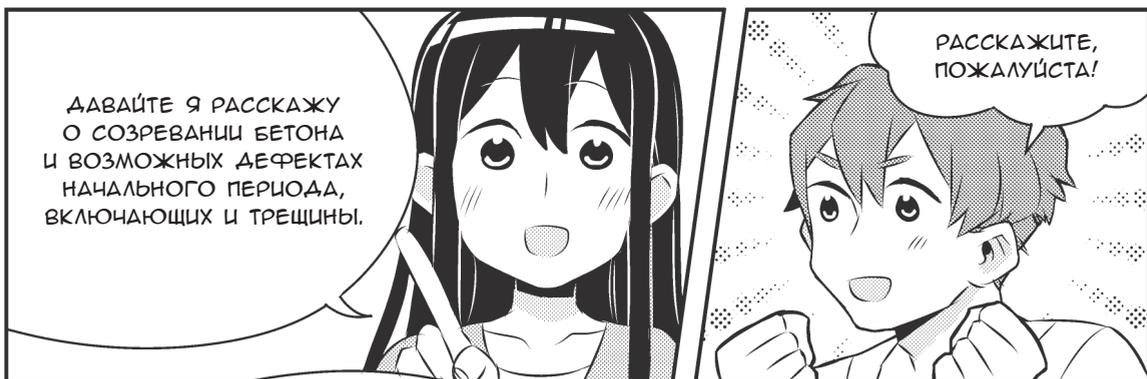
В СФЕРЕ ГРАВИТАЦИОННЫХ  
БЕТОННЫХ ПЛОТИН В ЯПОНИИ  
БЫЛО РАЗРАБОТАНО МНОГО  
УНИКАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ.

НАПРИМЕР,  
ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ  
ПЛОТИНЫ МЯГАСЭ ТЕХНОЛОГИЯ RCD  
(ROLLER COMPACTED DAM) ПОЗВОЛИЛА  
СОКРАТИТЬ РАСХОДЫ НА СТРОИТЕЛЬСТВО  
И УМЕНЬШИТЬ СРОК ВОЗВЕДЕНИЯ ПЛОТИНЫ.  
ЭТА ТЕХНОЛОГИЯ СТАЛА ОЧЕНЬ ПОПУЛЯРНА  
В ЯПОНИИ.



RCDI  
Roller  
Compacted  
Dam





## 4.1. СОЗРЕВАНИЕ БЕТОНА

КАК Я УЖЕ РАССКАЗЫВАЛА  
РАНЬШЕ, КОГДА ЦЕМЕНТ  
КОНТАКТИРУЕТ С ВОДОЙ,  
ПРОИСХОДИТ РЕАКЦИЯ  
ГИДРАТАЦИИ С ВЫДЕЛЕНИЕМ  
ТЕПЛОТЫ, В РЕЗУЛЬТАТЕ ЧЕГО  
ОБРАЗУЮТСЯ  
НОВЫЕ ВЕЩЕСТВА.

АГА.

ЭТО КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ  
ВЕЩЕСТВА: ГИДРОКСИД  
КАЛЬЦИЯ, ЭТРИНГИТ,  
МОНОСУЛЬФАТ...

Кристаллы этрингита

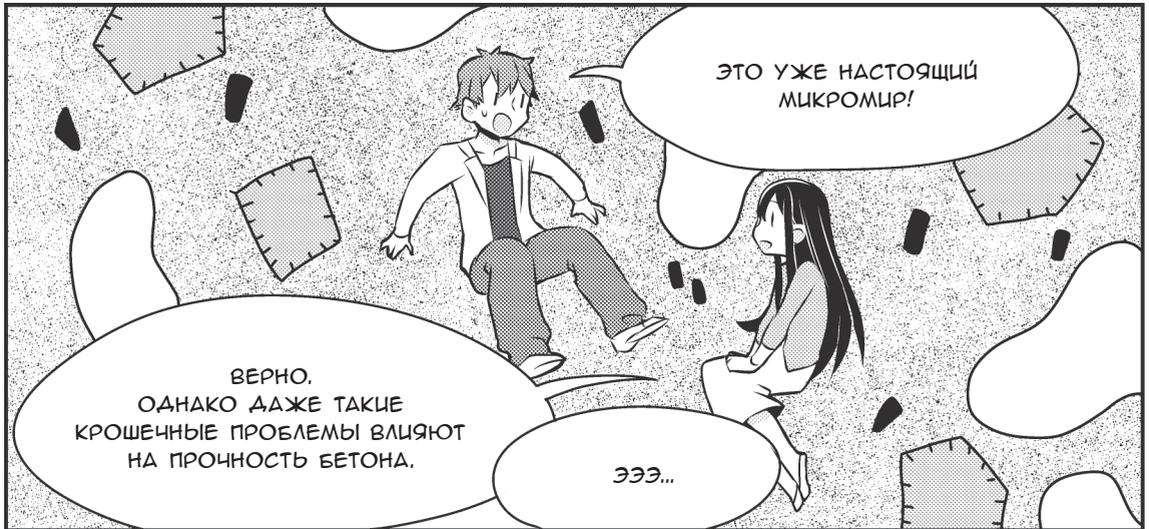
Кристаллы гидроксида  
кальция, окруженные  
гелем C-S-H

...И ТАК НАЗЫВАЕМЫЙ  
ГЕЛЬ C-S-H\*, СОДЕРЖАЩИЕ  
ВОДУ ПРОДУКТЫ  
ГИДРАТАЦИИ.

\* Смотрите стр. 76.



\*  $10^{-9}$  метра, или одна тысячная микрометра.



ЭТО УЖЕ НАСТОЯЩИЙ  
МИКРОМЦР!

ВЕРНО.  
ОДНАКО ДАЖЕ ТАКИЕ  
КРОШЕЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ВЛИЯЮТ  
НА ПРОЧНОСТЬ БЕТОНА.

эээ...



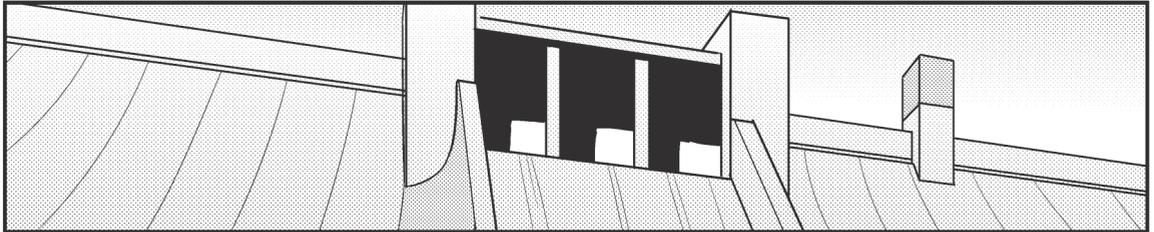
ТО, НАСКОЛЬКО ПРОЧНЫМ  
ПОЛУЧИТСЯ БЕТОН, ЗАВИСИТ ОТ КАЧЕСТВА  
ЦЕМЕНТНОГО ТЕСТА, ВЫПОЛНЯЮЩЕГО  
РОЛЬ КЛЕЯ, СКРЕПЛЯЮЩЕГО ЗАПОЛНИТЕЛИ.

А КАЧЕСТВО ЦЕМЕНТНОГО ТЕСТА  
ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ ПРОЧНОСТЬЮ  
СВЯЗЕЙ ВНУТРИ ГЕЛЯ С-С-Н,  
ПОЛУЧЕННОГО В РЕЗУЛЬТАТЕ  
РЕАКЦИИ ГИДРАТАЦИИ.



ТО ЕСТЬ ЕСЛИ КЛЕИ ХОРОШИИ,  
ТО ЗАПОЛНИТЕЛИ НАДЕЖНО  
ЗАФИКСИРОВАНЫ, И БЕТОН  
ПОЛУЧИТСЯ ПРОЧНЫМ, ТАК?





## 4.2. ТЕРМИЧЕСКИЕ ТРЕЩИНЫ



ХУЖЕ НЕКУДА,  
ЕСЛИ НА ЗДАНИИ,  
НАПРИМЕР, ПОЯВЯТСЯ  
ТРЕЩИНЫ ЕЩЁ ДО ТОГО,  
КАК ОНО ВВЕДЕНО  
В ЭКСПЛУАТАЦИЮ, ДА?..



ЭТО ТОЖНО...

В ОСНОВНОМ ДЕФЕКТЫ  
НА НАЧАЛЬНОМ ЭТАПЕ  
БЫВАЮТ ДВУХ ВИДОВ:  
ТЕРМИЧЕСКИЕ ТРЕЩИНЫ  
И ТРЕЩИНЫ ИЗ-ЗА УСАДКИ  
ПРИ ВЫСЫХАНИИ.

Термические  
трещины

Трещины из-за усадки  
при высыхании

И ТОТ, И ДРУГОЙ ВИД ТРЕЩИН  
ВОЗНИКАЕТ ИЗ-ЗА ИЗМЕНЕНИЯ  
ОБЪЁМА БЕТОНА.  
ДАВАЙТЕ СНАЧАЛА Я ОБЪЯСНЮ,  
ЧТО ТАКОЕ ТЕРМИЧЕСКИЕ ТРЕЩИНЫ.

БУДЬТЕ ТАК  
ЛЮБЕЗНЫ!

Термические трещины

ТЕРМИЧЕСКИЕ ТРЕЩИНЫ, КАК МОЖНО ДОГАДАТЬСЯ ПО НАЗВАНИЮ, ВОЗНИКАЮТ ИЗ-ЗА ВЫДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОТЫ ВО ВРЕМЯ РЕАКЦИИ ГИДРАТАЦИИ.

В КАКИХ ЖЕ СЛУЧАЯХ ОНИ ВОЗНИКАЮТ?

НАПРИМЕР, ЕСЛИ ЗАЛИВКА БЕТОНА ПРОИСХОДИТ ПРИ ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ИЛИ ЕСЛИ ОТЛИВАЕМЫЙ ОБЪЕМ ДОВОЛЬНО БОЛЬШОЙ. В ТАКИХ СЛУЧАЯХ ВЫДЕЛЯЕМАЯ ВО ВРЕМЯ ГИДРАТАЦИИ ТЕПЛОТА НАКАПЛИВАЕТСЯ ВНУТРИ КОНСТРУКЦИИ.

ВОТ ОНО ЧТО...

ВО ВРЕМЯ РЕАКЦИИ ГИДРАТАЦИИ ВЫДЕЛЯЕТСЯ ДОВОЛЬНО МНОГО ТЕПЛОТЫ. ТАК, НАПРИМЕР, ЕСЛИ В РЕАКЦИЮ ВСТУПАЕТ 1 ГРАММ ЦЕМЕНТА (САЛИТА), ТО ВЫДЕЛИТСЯ 120 КАЛЛ (ИЛИ 504 ДЖОУЛЯ) ТЕПЛОТЫ.

ЧТОБЫ УВЕЛИЧИТЬ ТЕМПЕРАТУРУ 1 ГРАММА ВОДЫ НА 1 °С, ТРЕБУЕТСЯ 1 КАЛЛ ЭНЕРГИИ. ЗНАЧИТ, ЕСЛИ ИМЕЕТСЯ ОДИНАКОВОЕ КОЛИЧЕСТВО ВОДЫ И ЦЕМЕНТА, ТО ЭНЕРГИИ ДОСТАТОЧНО, ЧТОБЫ ВОДУ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ МОЖНО БЫЛО МГНОВЕННО ВСКИПЯТИТЬ!

АА. ПОЭТОМУ-ТО ВНУТРИ БЕТОНА ДОВОЛЬНО ЖАРКО\*.

\* Температура внутри может достигать 60-80 °С.

В ТО ВРЕМЯ КАК ВНУТРИ  
ЗАЛИТОГО БЕТОНА  
ПОДНИМАЕТСЯ ТЕМПЕРАТУРА...

УФ-ФУУ

...ПОВЕРХНОСТЬ БЕТОНА  
ОХЛАЖДАЕТСЯ НАРУЖНЫМ  
ВОЗДУХОМ.

БРР РРРР

ТО ЕСТЬ ВОЗНИКАЕТ  
РАЗНИЦА ТЕМПЕРАТУР  
ВНУТРИ И СНАРУЖИ, ДА?

ИМЕННО!

БЕТОН, ТАК ЖЕ КАК  
И ДРУГИЕ МАТЕРИАЛЫ,  
ПРИ НАГРЕВАНИИ РАСШИРЯЕТСЯ,  
А ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ СЖИМАЕТСЯ.  
ИЗ-ЗА ТОГО ЧТО С ВНЕШНЕЙ СТОРОНЫ  
ПРОИСХОДИТ СЖАТИЕ, А ВНУТРИ -  
РАСШИРЕНИЕ, НА ПОВЕРХНОСТИ  
БЕТОНА ВОЗНИКАЕТ НАПРЯЖЕНИЕ.  
БЕТОН ЖЕ ПЛОХО ПРОТИВОСТОИТ  
НАПРЯЖЕНИЮ, И ПОЭТОМУ  
МОГУТ ПОЯВИТЬСЯ  
ТРЕЩИНЫ.

холодно

жарко

сжатие

расширение

ВОТ ОНО КАК...

### 4.3. ТРЕЩИНЫ ИЗ-ЗА УСАДКИ ПРИ ВЫСЫХАНИИ





**Механизм возникновения трещин из-за усадки при высыхании**

Высыхание

Гель

Из-за поверхностного натяжения воды в капиллярных порах и поверхностного натяжения геля приходит в действие сила, вызывающая сжатие (усадку)

Усадочное напряжение (количество воды в пустотах)

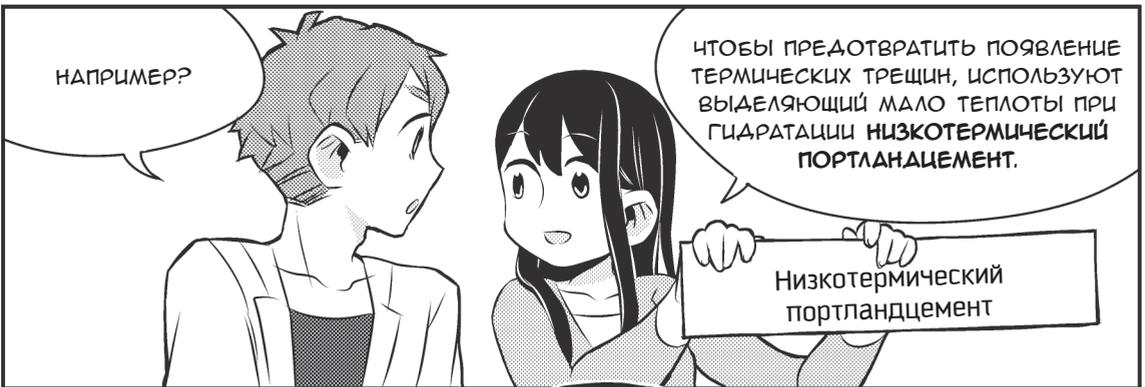
Из-за разницы в усадке между а и б возникают трещины

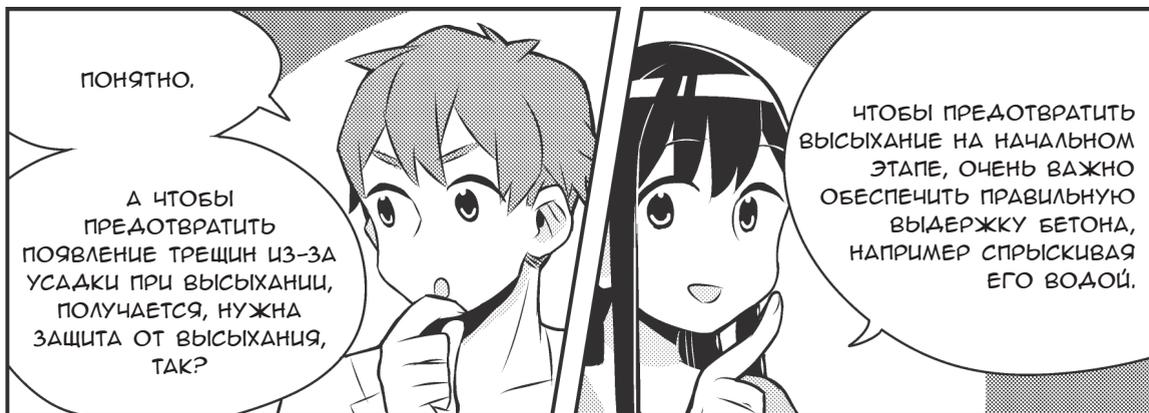
КОГДА БЕТОН ВЫСЫХАЕТ, ТО ВЛАГА ВЫХОДИТ НАРУЖУ, И ЧАСТИ, БЛИЗКИЕ К ПОВЕРХНОСТИ, НАЧИНАЮТ СЖИМАТЬСЯ (ПРОИСХОДИТ УСАДКА), ВНУТРИ ЖЕ СЖАТИЕ (УСАДКА) ПОЧТИ НЕ ПРОИСХОДИТ. ИЗ-ЗА ЭТОЙ РАЗНИЦЫ НА ПОВЕРХНОСТИ ВОЗНИКАЕТ НАПРЯЖЕНИЕ, ЧТО И ВЕДЁТ К ОБРАЗОВАНИЮ ТРЕЩИН.

## 4.4. СПОСОБЫ БОРЬБЫ С ТРЕЩИНАМИ



ДЛЯ ЭТОГО НА СТРОИТЕЛЬНЫХ ПЛОЩАДКАХ ИСПОЛЬЗУЮТСЯ РАЗЛИЧНЫЕ МЕТОДИКИ: РАЗНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ДИЗАЙН, СПОСОБЫ СТРОИТЕЛЬСТВА.





ПОНЯТНО.

А ЧТОБЫ  
ПРЕДОТВРАТИТЬ  
ПОЯВЛЕНИЕ ТРЕЩИН ИЗ-ЗА  
УСАДКИ ПРИ ВЫСЫХАНИИ,  
ПОЛУЧАЕТСЯ, НУЖНА  
ЗАЩИТА ОТ ВЫСЫХАНИЯ,  
ТАК?

ЧТОБЫ ПРЕДОТВРАТИТЬ  
ВЫСЫХАНИЕ НА НАЧАЛЬНОМ  
ЭТАПЕ, ОЧЕНЬ ВАЖНО  
ОБЕСПЕЧИТЬ ПРАВИЛЬНУЮ  
ВЫДЕРЖКУ БЕТОНА,  
НАПРИМЕР СПРЫСКИВАЯ  
ЕГО ВОДОЙ.



КРОМЕ ТОГО,  
ЕСЛИ ПОНЕМНОГУ  
ИСПОЛЬЗОВАТЬ ТАК НАЗЫВАЕМЫЕ  
СНИЖАЮЩИЕ УСАДКУ ДОБАВКИ  
ИЛИ РАСШИРЯЮЩИЕ ДОБАВКИ,  
ТО ТОЖЕ МОЖНО СНИЗИТЬ  
УСАДКУ БЕТОНА.

И ТАКИЕ ПОЛЕЗНЫЕ ДОБАВКИ  
СУЩЕСТВУЮТ!

Расширяющая  
добавка

Снижающая  
усадку добавка



А ЕЩЁ ЧТОБЫ ВСЁ-ТАКИ  
ВОЗНИКШИЕ ТРЕЩИНЫ  
ОСТАВАЛИСЬ НЕБОЛЬШИМИ,  
ВАЖНО ПРАВИЛЬНО  
УСТАНОВИТЬ АРМАТУРУ.

К-КАК ЭТО?!

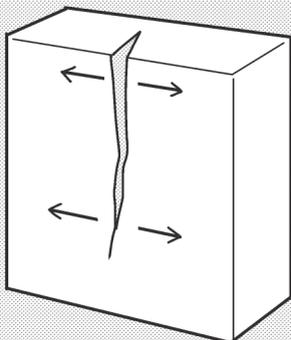
**БАЦ!**

ЕСЛИ АРМАТУРА  
УСТАНОВЛЕНА В НАПРАВЛЕНИИ,  
ПЕРПЕНДИКУЛЯРНОМ ТРЕЩИНЕ,  
ТО ДАЖЕ ЕСЛИ ТРЕЩИНА  
ПОЯВИТСЯ, ОНА НЕ БУДЕТ  
УВЕЛИЧИВАТЬСЯ.

ТО ЕСТЬ ПРЕДОТВРАТИТЬ  
БОЛЬШЕ ТРЕЩИНЫ  
МОЖНО С ПОМОЩЬЮ  
УСТАНОВКИ АРМАТУРЫ?

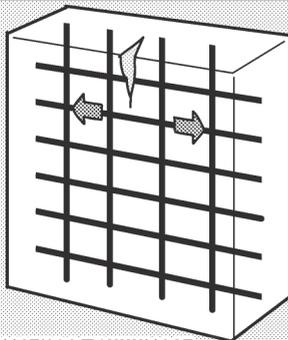
ВЖИХ!

Арматура отсутствует



Трещина расширяется

Арматура присутствует



Арматура принимает  
на себя напряжение, трещина  
остается маленькой

ПОЛУЧАЕТСЯ,  
ЧТО ПОЗАБОТИТЬСЯ  
О ТРЕЩИНАХ НУЖНО  
ЗАРАНЕЕ, ТАК?

ПОСЛЕ ТОГО КАК АРМАТУРА  
И БЕТОН ПРИКРЕПЛЯЮТСЯ  
ДРУГ К ДРУГУ, АРМАТУРА ПРИНИМАЕТ  
НА СЕБЯ НАПРЯЖЕНИЕ, И ПОЭТОМУ  
ТРЕЩИНА НЕ РАСШИРЯЕТСЯ.  
КОГДА ЖЕ ИМЕЕТСЯ ТОЛЬКО БЕТОН  
БЕЗ АРМАТУРЫ, ТО ТРЕЩИНА  
С ТЕЧЕНИЕМ ВРЕМЕНИ БУДЕТ  
ПОСТОЯННО УВЕЛИЧИВАТЬСЯ.



И НАКОНЕЦ, ЧТОБЫ ДЕРЖАТЬ  
ПОД КОНТРОЛЕМ МЕСТА ВОЗМОЖНОГО  
ВОЗНИКНОВЕНИЯ ТРЕЩИН, ТАКИМ ОБЛАСТЯМ  
ЗАРАНЕЕ УДЕЛЯЮТ ОСОБОЕ ВНИМАНИЕ.



ОПРЕДЕЛИВ МЕСТА ВОЗНИКНОВЕНИЯ  
ТРЕЩИН, МОЖНО ЗАЩИТИТЬ ОСТАЛЬНЫЕ  
ОБЛАСТИ, ВЕРНО?!



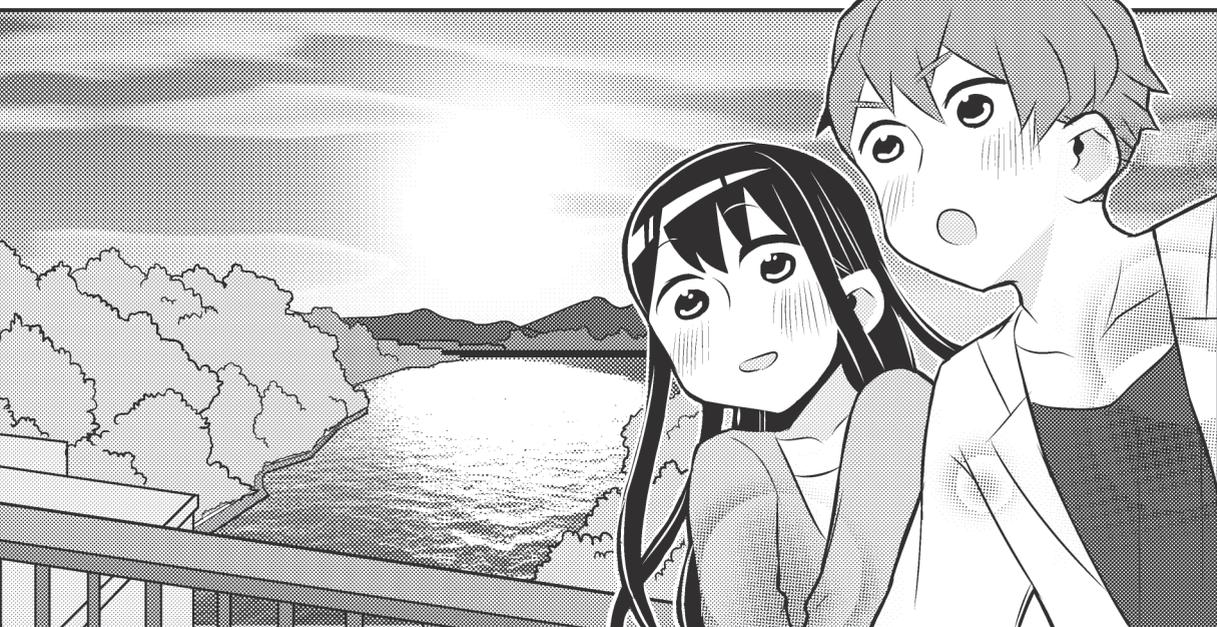
НАДО ЖЕ, СКОЛЬКО РАЗНЫХ  
СПОСОБОВ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ  
И КОНТРОЛЯ НАД ТРЕЩИНАМИ  
СУЩЕСТВУЕТ, ЧТОБЫ  
ОБЕСПЕЧИТЬ  
ДОЛГОВЕЧНОСТЬ  
БЕТОНА!

ТАК И ЕСТЬ!



ЗНАЕТЕ, КЕНАЗИ,  
С ВАМИ ТАК ИНТЕРЕСНО  
РАЗГОВАРИВАТЬ,  
ЧТО Я НЕ ЗАМЕЧАЮ,  
КАК ПРОЛЕТАЕТ ВРЕМЯ!





### Микроструктура затвердевающего цемента

Сразу после замешивания цемента заполненные водой участки в результате реакции гидратации постепенно замещаются продуктами гидратации. На рис. 4.1 схематически изображены изменения, происходящие внутри цемента в процессе его затвердевания в результате гидратации. Вокруг частей цемента возникают продукты гидратации; пространства, ранее заполненные водой, сокращаются; продукты гидратации тянутся друг к другу и объединяются – так и происходит постепенное затвердевание. Среди продуктов гидратации большую часть занимает C-S-H, оставшаяся часть состоит из кристаллических веществ: гидроксида кальция  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , этtringита и моносульфата.

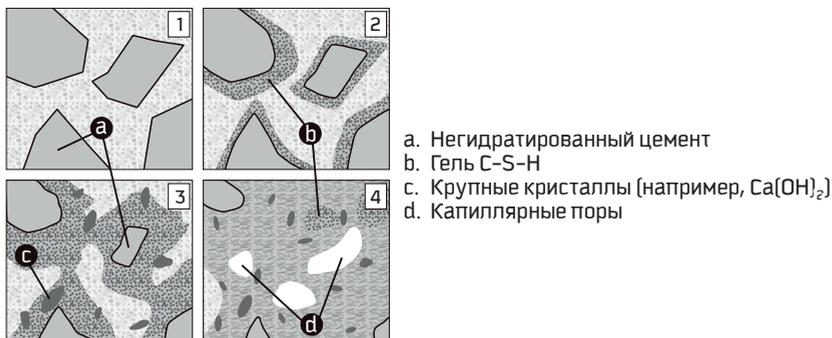


Рис. 4.1. Развитие реакции гидратации и процесс затвердевания

Когда цемент взаимодействует с водой, из цемента выделяются минералы, которые начинают вступать в реакцию, в результате чего образуются продукты гидратации. В то же время вода начинает проникать и внутрь цементных зерен, и внутри цементных зерен тоже происходит реакция. Продукты гидратации, получаемые вне цементных зерен, называют **внешними**, а получаемые в результате реакции внутри цементных зерен называют **внутренними продуктами гидратации** (рис. 4.2).

Крупные пустоты вовне цементных зерен, где отсутствуют продукты гидратации, называют **капиллярными порами**. Это места, в которых раньше была вода и которые образуются в результате затвердевания цемента. Они представляют собой довольно крупные образования, измеряемые в микрометрах. Хотя они и считаются довольно крупными, но микрометры равны  $1,0 \cdot 10^{-6}$  м, другими словами, это одна миллионная часть метра, поэтому эти явления относятся к микромиру, невидимому невооруженным взглядом. Если же посмотреть ещё

более приближенно на структуру C-S-H, то мы увидим микромир ещё меньшего масштаба. Гидроксиды C-S-H имеют слоистую структуру, внутри них имеются пустоты, называемые **гелевые поры**, и, кроме того, между слоями гидроксида C-S-H тоже имеются пустоты, называемые **межслойными порами**. Гелевые поры совсем крошечные, они измеряются нанометрами ( $1,0 \cdot 10^{-9}$  м, то есть одна миллиардная метра). Межслойные поры представляют собой ещё одно микропространство шириной в одну молекулу воды, ширина пор равна примерно 0,3 нм (3 ангстрема [А]).

Находящуюся здесь воду называют **межслойной водой**. Пространство между слоями чрезвычайно маленькое, поэтому межслойная вода получается связана силами поверхностного натяжения между твёрдыми телами, и при высыхании при нормальной температуре эта вода не исчезает.

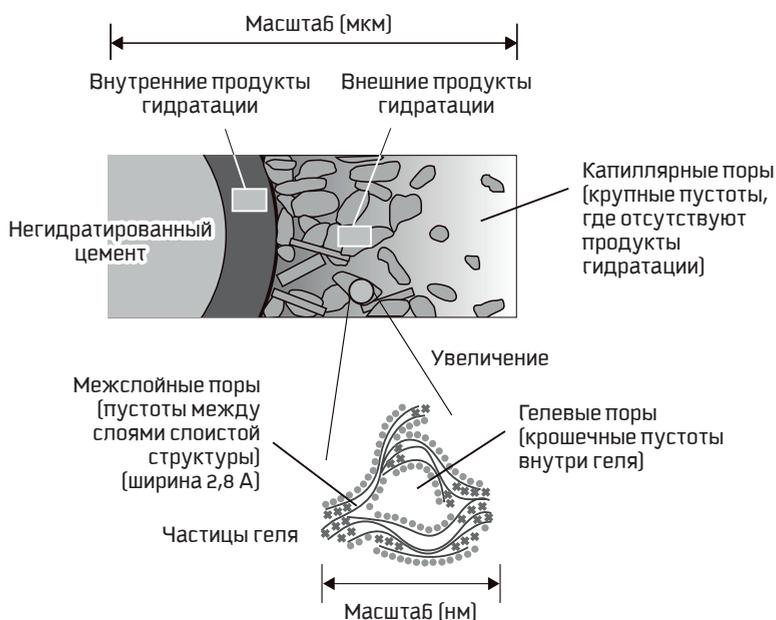


Рис. 4.2. Схематичное представление структуры затвердевающего цемента

Таким образом, в затвердевшем цементе возникают пустоты совершенно разных размеров (от нанометров до миллиметров), начиная с равных молекуле воды микроскопических пустот и заканчивая видимыми невооруженным глазом трещинами (рис. 4.3). Свойства и качество бетона, имеющего пористую структуру, напрямую зависят от структуры этих пустот. Например, прочность бетона зависит от свойств цементного теста, выступающего в качестве клея, связывающего заполнители. Качество же цементного теста зависит от прочно-

сти связей внутри геля C-S-H, и наличие довольно крупных капиллярных пор приводит к ослаблению этих связей. Следовательно, важным вопросом становится, насколько пустое пространство заполнено продуктами гидратации. Кроме того, чтобы увеличить срок службы бетона, нужно защитить его от проникновения извне разрушающих вредных веществ. И сокращение количества крупных пустот (капиллярных пор), которые служат путём проникновения вредных веществ и местом разрушительной реакции, будет также ключом для решения этой проблемы. Для того же чтобы сократить количество капиллярных пор, сокращают расстояние между цементными зёрнами, увеличивая плотность цементного теста (уменьшая водоцементное соотношение). Кроме того, важно обеспечить правильную выдержку цемента. Если, уменьшая водоцементное соотношение, сократить расстояние между зёрнами цемента, то количество крупных пустот на начальном этапе уменьшится и поры эффективно заполнятся, и если обеспечить достаточное увлажнение, чтобы реакция гидратации прошла гладко, то все эти меры в совокупности позволят получить бетон с меньшим количеством пустот.

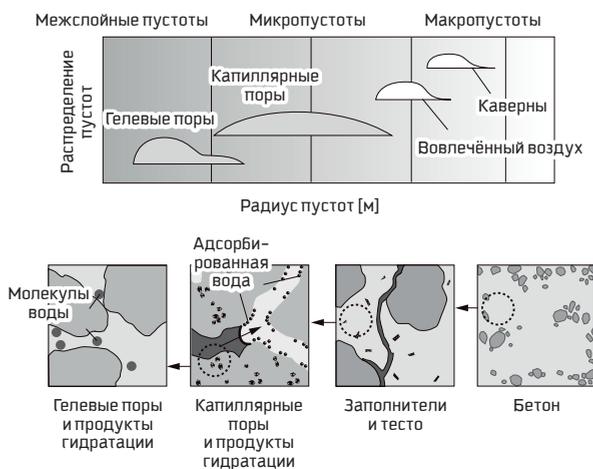


Рис. 4.3. Бетон в разных масштабах

## Реакция гидратации и прочность бетона

В последние годы стало возможным создание высокоточных компьютерных симуляций процесса гидратации цемента с воссозданием возникающих при этом пустот и с изменением прочности бетона в зависимости от разных условий<sup>1</sup>. Образец бетона цилиндрической формы высотой в 20 см и с диаметром

<sup>1</sup> Koichi Maekawa, Tetsuya Ishida, Toshiharu Kishi. Multi-scale modeling of structural concrete. Taylor and Francis, 2009.

10 см был воссоздан на компьютере, и на основе модели был рассчитан процесс гидратации, как показано на рис. 4.4. Было рассмотрено два вида бетона с водоцементным соотношением 30 % и 50 %, и для каждого вида были проведены расчеты выдержки бетона при трёх температурах (10, 20 и 30 °С). По вертикальной оси на рис. 4.4 отложены показатели того, сколько процентов цемента вступило в реакцию. По горизонтальной оси показан возраст бетона в днях, выраженный через логарифм.

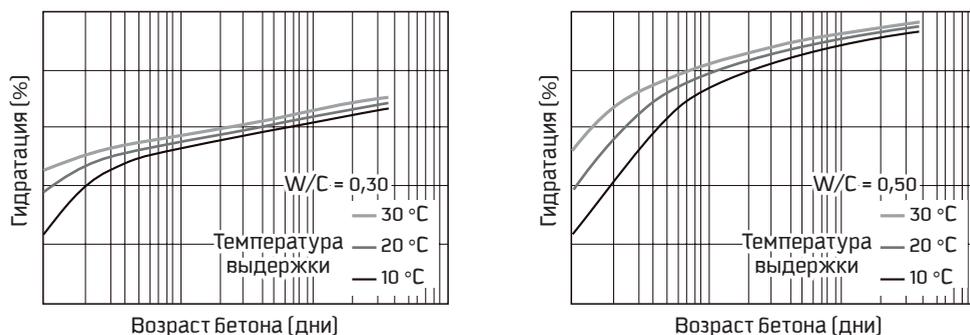


Рис. 4.4. Аналитическая модель гидратации цемента

Прежде всего рассмотрим влияние температуры выдержки (температуры окружающей среды, в которой находится бетон). Как можно видеть, для обоих видов бетона реакция гидратации протекает по-разному в зависимости от температуры выдержки. Как было показано в главе 3, реакция гидратации сильно зависит от температуры, и мы видим, что при температуре 30 °С реакция протекает быстро, а при температуре 10 °С реакция идёт менее активно.

Теперь рассмотрим влияние водоцементного соотношения на процесс гидратации. Как видно на рис. 4.4, в случае бетона с водоцементным соотношением 50 % по прошествии года более чем 90 % цемента уже вступят в реакцию, в то время как в случае бетона с водоцементным соотношением 30 % через год гидратация охватит менее 70 % цемента. Причина этого в том, что при низком водоцементном соотношении (когда содержание цемента относительно воды высокое) необходимой для гидратации воды начинает не хватать, что и замедляет реакцию. Это значит, что количество воды на начальном этапе недостаточно для полной реакции цемента. Про цемент с низким водоцементным соотношением можно сказать, что у него есть скрытые резервы для продолжения реакции гидратации, так как зерна негидратированного цемента остаются внутри, и при снабжении их водой реакция может продолжиться.

Теперь поговорим о прочности цемента. На рис. 4.5 представлены расчёты для тех же самых условий. Хотя с точки зрения гидратации бетон с водоцементным соотношением 30 % по прошествии года не достигал и 70 %, то с точ-

ки зрения прочности его значение через год почти в два раза выше, чем у бетона с водоцементным соотношением 50 %. Другими словами, прочность цемента определяется не только степенью гидратации, но и свойствами сформированной в процессе микроструктуры бетона. Как говорилось раньше, при низком водоцементном соотношении меньше количество крупных пустот вроде капиллярных пор и выше прочность получаемого бетона.

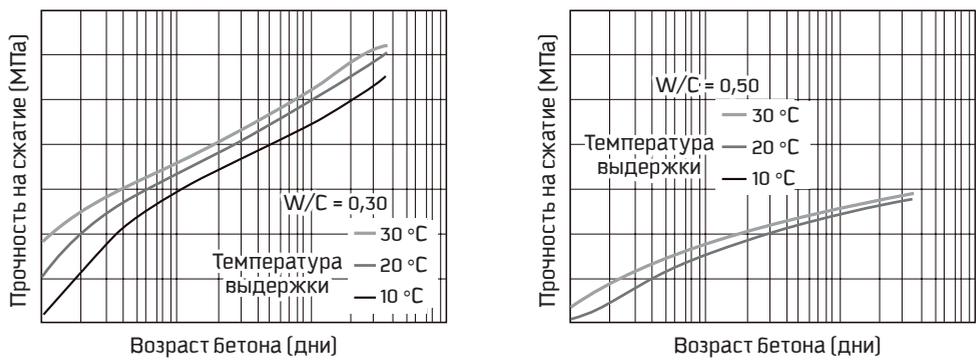


Рис. 4.5. Аналитическая модель прочности бетона

В предыдущих симуляциях мы исходили из условия выдержки с гидроизоляцией, то есть выдержки при защите бетона от выхода влаги наружу, например с помощью покрытия защитной плёнкой. Теперь рассчитаем ситуацию, когда высыхание происходит в начальном периоде и влага выходит наружу. Возьмём бетон с водоцементным соотношением 50 % и сравним три ситуации: когда защитная плёнка убирается через 1 день, когда плёнка убирается через 7 дней, и когда плёнка остаётся на 28 дней, обеспечивая достаточную выдержку. Результаты данной симуляции представлены на рис. 4.6. Если выдержка с гидроизоляцией заканчивается через 1 день, то прочность бетона достигает своего

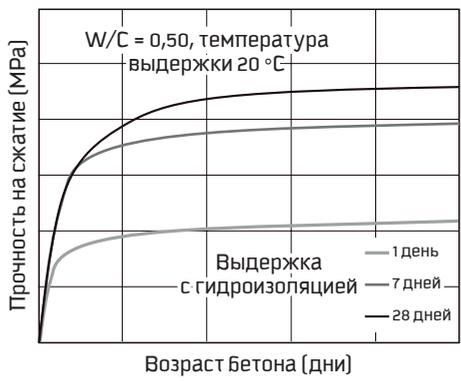


Рис. 4.6. Влияние выдержки на прочность бетона

пика на значении, совсем немного превышающем 20 МПа, в то время как выдержка в течение 28 дней обеспечит значение прочности более чем в 2 раза, так как сохранение влажности в начальном периоде обеспечивает протекание реакции гидратации. Что ещё раз доказывает важность правильной выдержки для получения качественного бетона.

## Трещины из-за выделения теплоты при гидратации

По причине выделения теплоты при гидратации цемента в конструкции могут появляться трещины. Такие трещины называются термическими, и они наносят вред долговечности и внешнему виду строения. Термические трещины возникают из-за изменений объёма бетона (ширины), сопровождаемых изменением температуры.

Относительный показатель, демонстрирующий, насколько изменится ширина объекта при увеличении или уменьшении температуры на  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , называется **коэффициентом линейного расширения**. И хотя коэффициент линейного расширения бетона меняется в зависимости от марки цемента и от вида заполнителей, в грубом приближении при увеличении температуры на  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  в бетоне возникает деформация расширения (температурная деформация) примерно на 10 мкм. Если, например, имеется объект с длиной  $l$  и при каких-то обстоятельствах его длина меняется на величину  $\Delta l$ , то показатель, равный  $\Delta l/l$ , и называется **деформацией**. Коэффициент линейного расширения 10 мкм/ $^{\circ}\text{C}$  означает, что бетонный объект длиной 1 м при увеличении температуры на  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  растянется на  $1\text{ м} \times 500\text{ мкм} (500 \cdot 10) = 5\text{ мм}$ . Возможно, вы думаете, что всего-то 5 мм при изменении на  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  – это ничтожно мало, но бетон – это твёрдый материал. Подобно тому, как для растягивания жёсткой пружины требуется приложить большую силу так, чтобы произошло расширение или сжатие твёрдого бетона, внутри объекта должна возникнуть большая сила. Кстати, коэффициент линейного расширения железной арматуры равен коэффициенту линейного расширения бетона – примерно 10 мкм/ $^{\circ}\text{C}$ . Если бы эти значения были разными для бетона и арматуры, то при одинаковом изменении температуры в бетоне и в арматуре возникла бы разная температурная деформация, что могло бы привести к разным дефектам вроде трещин. Поэтому то, что случайно коэффициент линейного расширения бетона и железной арматуры оказался одинаковым, большое везение, позволившее создать такой великолепный материал, как железобетон.

Термические трещины можно грубо разделить на два типа: с внутренним сдерживанием и с внешним сдерживанием. Ситуация с внутренним сдерживанием возникает по причине разницы температур внутри объекта. В результате гидратации цемента выделяется теплота, и внутри объекта температура повышается, но при этом в местах, близких к поверхности, тепло частично выходит, и температура в этих местах становится ниже по сравнению с температурой

внутри объекта. Другими словами, возникает разница в деформациях из-за разницы температур во внутренних и внешних частях. В это время объект целиком стремится сохранить свою плоскость (гипотеза плоских сечений), чем сдерживает температурную деформацию. В результате на поверхности возникает сила растяжения, а внутри сила сжатия. Таков механизм возникновения трещин из-за внутреннего сдерживания (рис. 4.7).

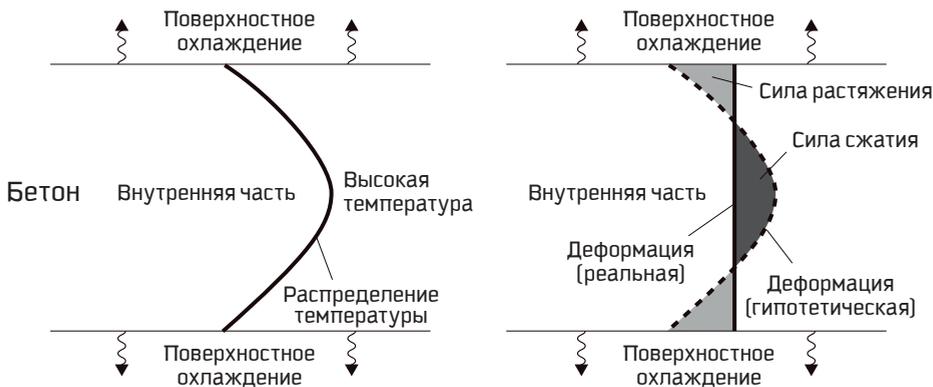


Рис. 4.7. Механизм возникновения сил из-за внутреннего сдерживания

В случае внешнего сдерживания термическая деформация, возникающая из-за выделения теплоты при гидратации, сдерживается извне, и вследствие того, что бетон не может деформироваться свободно, возникает сила, которая становится причиной появления трещин. Например, когда в качестве основания используется земля, скала или уже затвердевший бетон, а сверху заливается новый бетон, то как раз происходит внешнее сдерживание деформации вследствие выделения тепла. В левой части рис. 4.8 приведён пример, когда сдерживание между новым и уже затвердевшим бетоном не возникает (например, если между старым и новым бетоном существует вал/ролик, допускающий расширение и сжатие), и так как новый бетон может деформироваться свободно, то сила не появляется. Однако обычно уже затвердевший и новый бетон образуют одно целое, и в этом случае происходит сдерживание деформации, вследствие чего внутри нового бетона возникает сила, служащая причиной появления трещин.

Чтобы уменьшить количество термических трещин, необходимо применять различные методики: использовать разные материалы, дизайн, способы строительства. С точки зрения материалов эффективными методами являются использование низкотермического портландцемента и/или добавок с низким выделением теплоты вроде летучей золы. Кроме того, в строительстве есть способ охлаждения составляющих перед изготовлением бетона, он называется **предварительное охлаждение**. В этом случае используют лёд или жидкий азот. Ещё

иногда осуществляют **трубное охлаждение**, это когда температуру понижают, пуская по трубам в сооружении холодную воду.

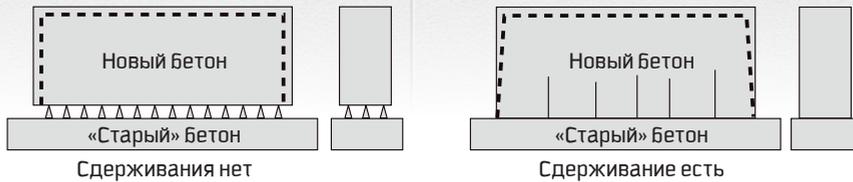


Рис. 4.8. Механизм возникновения термических трещин из-за внешнего сдерживания

## Трещины при усадке

Другой частой причиной появления трещин в объекте является усадка бетона, связанная с уровнем влажности внутри объекта. Пористые материалы наподобие бетона с большим количеством мелких пустот при потере влаги из-за высыхания сжимаются в объёме.

Это называется **усадкой при высыхании**. Кроме того, при использовании бетона с низким водоцементным соотношением для реакции гидратации может не хватить только той влажности, которая содержалась изначально. В таком случае если не обеспечить удержание влаги посредством гидроизоляции, то вследствие гидратации внутри бетона произойдёт высыхание. Это называется **самовысыханием**, а следующее за ним уменьшение в объёме называется **самоусадкой**. Если речь идёт о часто используемом бетоне с водоцементным соотношением 50–60 %, то в этом случае самоусадка будет небольшой. Однако если используется прочный бетон с низким водоцементным соотношением, то изменение в объёме из-за самоусадки будет довольно значительным, и это необходимо учитывать при проектировании.

Существует несколько гипотез о том, что вызывает усадку бетона. Считается, что в регионах с относительно высокой влажностью усадка происходит из-за силы поверхностного натяжения воды в капиллярных порах. В узком пространстве между стенками в результате поверхностного натяжения воды образуются так называемые «мениски» – искривления поверхности жидкости. Вследствии чего возникают капиллярные силы, вызывающие усадку внутри (рис. 4.9, левая часть). Кроме того, известно, что молекулы воды адсорбируются на поверхности продуктов гидратации C-S-H с большой площадью поверхности. По мере высыхания внутри пустот и снижения влажности среды увеличивается поверхностная энергия геля, что вызывает усадку (рис. 4.9, правая часть). Когда нет влаги, адсорбирующейся на поверхности, гель C-S-H сжимается. Помимо того, в слоистых структурах существует межслойная вода, и при её исчезновении тоже происходит усадка бетона из-за локальной деформации

слоистой структуры С-С-Н. Как понятно из вышесказанного, вода внутри бетона присутствует в разных формах: конденсат в капиллярных порах; влага, абсорбированная стенками пустот; межслойная вода, существующая в крайне тонком пространстве. Следовательно, при снижении относительной влажности внутри пустот из-за высыхания каждая форма воды исчезает в разное время, что приводит в действие разные сложные механизмы усадки.

При высыхании бетона влага частично выходит наружу, поэтому области, близкие к поверхности, сжимаются в большей степени, внутренние же части почти не сжимаются. В таком случае, как показано на рис. 4.7, согласно гипотезе плоских сечений при деформации плоская поверхность стремится остаться плоской, а значит, усадка из-за изменения влажности сдерживается, возникает сила натяжения поверхности, и аналогично термическим трещинам появляются трещины усадки. Чтобы предотвратить высыхание на начальном этапе, обеспечивают правильную выдержку бетона и/или используют так называемые снижающие усадку добавки или расширяющие добавки.

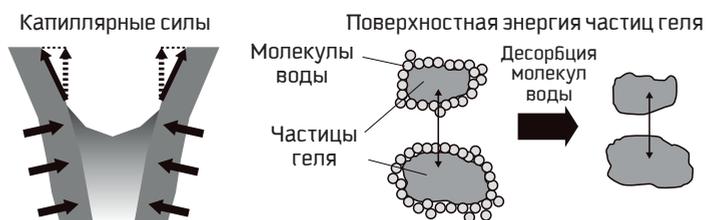


Рис. 4.9. Механизмы, вызывающие усадку



ГЛАВА 5

**ДОЛГОВЕЧНОСТЬ  
БЕТОННЫХ  
КОНСТРУКЦИЙ**



СМОТРИТЕ,

ЭТО ЖЕ ЗАДАНИЕ  
КОРПОРАЦИИ МИЦУИ БУССАН  
В ЁКОГАМА!

ЭТО ЖЕ ТО САМОЕ ЗАДАНИЕ,  
КОТОРОЕ БЫЛО ПОСТРОЕНО В 1911 ГОДУ  
ПО ПРОЕКТУ АРХИТЕКТОРА ЭНДО ОТО  
И ЯВЛЯЕТСЯ ОДНИМ ИЗ САМЫХ СТАРЫХ  
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЗАДАНИЙ В ЯПОНИИ,  
НЕ ТАК ЛИ?



СРАЗУ ВИДНО,  
КАК ХОРОШО ВЫ УЧИТЕСЬ!

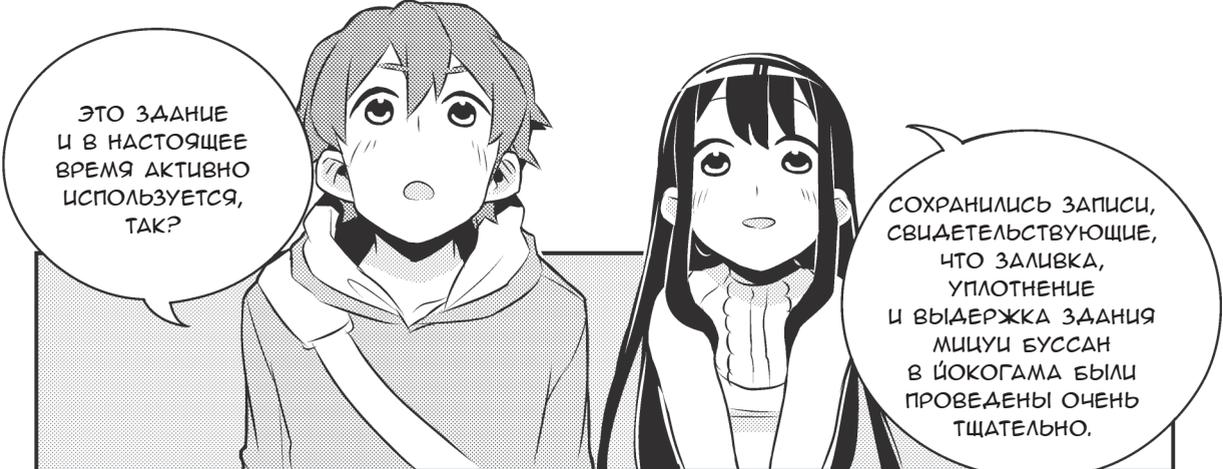
НЕТ, НУ  
ЧТО ВЫ...



В ТО ВРЕМЯ,  
ЧТОБЫ ПРИВЛЕЧЬ  
ИНОСТРАННУЮ ВАЛЮТУ,  
АКТИВНО ЭКСПОРТИРОВАЛИ  
ШЁЛК-СЫРЕЦ,  
И ЭТО ЗАДАНИЕ  
ПОСТРОИЛИ РЯДОМ  
СО СКЛАДОМ ШЁЛКА.

ОНО ВРОДЕ ТАКОЕ  
ПРОСТОЕ, НО ВМЕСТЕ  
С ТЕМ ОЧЕНЬ ЭЛЕГАНТНОЕ,  
НЕ ПРАВАА ЛИ?





ЭТО ЗАДАНИЕ  
И В НАСТОЯЩЕЕ  
ВРЕМЯ АКТИВНО  
ИСПОЛЬЗУЕТСЯ,  
ТАК?

СОХРАНИЛИСЬ ЗАПИСИ,  
СВИДЕТЕЛЬСТВУЮЩИЕ,  
ЧТО ЗАЛИВКА,  
УПЛОТНЕНИЕ  
И ВЫДЕРЖКА ЗАДАНИЯ  
В ЁКОГАМА БЫЛИ  
ПРОВЕДЕНЫ ОЧЕНЬ  
ТЩАТЕЛЬНО.



ПОТОМУ ЧТО В МЕСТАХ  
ВРОДЕ ЁКОГАМЫ,  
РАСПОЛОЖЕННЫХ РЯДОМ  
С МОРЕМ, СУЩЕСТВУЕТ ТАКАЯ  
ПРОБЛЕМА, КАК СОЛЕВАЯ  
КОРРОЗИЯ БЕТОНА.



ВОТ ОНО ЧТО!



ТОГАДА ДАВАЙТЕ  
СЕГОДНЯ Я РАССКАЖУ  
О РАЗРУШЕНИИ  
БЕТОНА, В ТОМ ЧИСЛЕ  
И О СОЛЕВОЙ  
КОРРОЗИИ.

ХОРОШО!

ТУТ СОВСЕМ РЯДОМ  
ПАРК ЯМАСИТА,  
МОЖЕТ, ЗАОДНО  
ПРОГУЛЯЕМСЯ ТУДА?

## 5.1. РАЗРУШЕНИЕ БЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

ЖЕЛЕЗОБЕТОН  
ОБЪЕДИНЯЕТ В СЕБЕ  
СВОЙСТВА АРМАТУРЫ, УСТОЙЧИВОЙ  
К РАСТЯЖЕНИЮ, И СВОЙСТВА БЕТОНА,  
УСТОЙЧИВОГО К СЖАТИЮ.

МОЖНО СКАЗАТЬ, ЧТО ЭТОТ  
КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ  
ОБЪЕДИНЯЕТ ПРЕИМУЩЕСТВА  
ВХОДЯЩИХ В ЕГО СОСТАВ  
КОМПОНЕНТОВ.

И ДАЖЕ ТАКОУ МАТЕРИАЛ  
ВСЁ РАВНО РАЗРУШАЕТСЯ?

РАЗВЕ ТАКОУ  
ПРОЧНЫЙ И ДОЛГОВЕЧНЫЙ  
МАТЕРИАЛ, КАК БЕТОН,  
НЕ УСТОЙЧИВ  
К ФИЗИЧЕСКИМ  
И ХИМИЧЕСКИМ  
ВОЗДЕЙСТВИЯМ?

И АРМАТУРА  
ВНУТРИ БЕТОНА  
РАЗВЕ НЕ ЗАЩИЩЕНА  
НАДЕЖНО  
ОТ РЖАВЧИНЫ?

ТАК-ТО ОНО ТАК...

ЖЕЛЕЗОБЕТОН ОБРАЗУЕТ СИЛЬНО  
ЩЕЛОЧНУЮ СРЕДУ, В КОТОРОУ  
ПОВЕРХНОСТЬ СТАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
ПОКРЫВАЕТСЯ ОКСИДНОУ ПЛЕНКОУ,  
НАЗЫВАЕМОУ ЕЩЕ  
ПАССИВИРУЮЩЕУ ПЛЕНКОУ.

ОДНАКО

ЕСЛИ КАЧЕСТВО БЕТОНА  
УХУДАШАЕТСЯ, ТО И РАЗРУШЕНИЕ  
КОНСТРУКЦИИ ПРОИСХОДИТ  
РАНЬШЕ, ЧЕМ ПРЕДПОЛАГАЛОСЬ.

ЗНАЧИТ,  
ЭТО ПРОБЛЕМА КАЧЕСТВА?

ПОЭТОМУ  
В СУРОВЫХ УСЛОВИЯХ  
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ  
НЕОБХОДИМО  
ПРЕДПРИНИМАТЬ МЕРЫ  
ПО ЗАЩИТЕ  
ОТ РАЗРУШЕНИЙ.

ТАК КАКОВЫ ЖЕ  
ПРИЧИНЫ ЭТИХ  
РАЗРУШЕНИЙ БЕТОННЫХ  
КОНСТРУКЦИЙ?

ЕСЛИ ОБОБЩИТЬ,

ТО ЕСТЬ  
ДВА ВИДА РАЗРУШЕНИЙ:  
КОРРОЗИЯ АРМАТУРЫ...

...И РАЗРУШЕНИЕ  
НЕПОСРЕДСТВЕННО  
САМОГО БЕТОНА.

## 5.2. ПРИЧИНЫ КОРРОЗИИ АРМАТУРЫ

### 5.2.1. Ионы хлорида

ИТАК,  
ПРЕЖДЕ ВСЕГО ПОГОВОРИМ  
О КОРРОЗИИ АРМАТУРЫ.

ПОЧЕМУ ЖЕ  
ВНУТРИ ЦЕМЕНТА,  
ГДЕ, КАЗАЛОСЬ БЫ, ДОЛЖНО  
БЫТЬ БЕЗОПАСНО, АРМАТУРА  
НАЧИНАЕТ РЖАВЕТЬ?

ЭТО ПРОИСХОДИТ ПОТОМУ,  
ЧТО ПОКРЫВАЮЩАЯ АРМАТУРУ  
ПАССИВИРУЮЩАЯ ПЛЁНКА  
РАЗРУШАЕТСЯ.

Пассивирующая  
плёнка

ПОЧЕМУ ЖЕ ОНА  
РАЗРУШАЕТСЯ?

ОСНОВНЫХ ПРИЧИН  
ДВЕ:

ПЕРВАЯ -  
СТОЛКНОВЕНИЕ  
С ИОНАМИ ГАЛОГЕНОВ...

Ионы  
галогенов

Ионы  
галогенов

Щёлочность

Щёлочность

...ДРУГАЯ ПРИЧИНА -  
ЭТО СНИЖЕНИЕ ЩЁЛОЧНОСТИ.

ИОНЫ ГАЛОГЕНОВ?..

ВОЗМОЖНО, ТЕРМИН ИОНЫ ГАЛОГЕНОВ КАЖЕТСЯ НЕПОНЯТНЫМ, НО К ЭТИМ ИОНАМ, НАПРИМЕР, ОТНОСИТСЯ СОДЕРЖАЩИЙСЯ В ОБЫЧНОЙ СОЛИ ХЛОРИД-ИОН.

ХЛОРИД-ИОНЫ ПОНЕМНОГУ ПРОНИКАЮТ ВНУТРИ БЕТОНА, НО КОГДА ОНИ ВДРУГ ДОСТИГАЮТ АРМАТУРЫ, ТО ЭТО ПРИВОДИТ К РАЗРУШЕНИЮ ПАССИВИРУЮЩЕЙ ПЛЁНКИ И К КОРРОЗИИ АРМАТУРЫ.

ВОТ КАК, ЗНАЧИТ, ХЛОРИД-ИОНЫ ПРОНИКАЮТ ВНУТРИ БЕТОНА, ДА?

ПО ЭТОМУ ПРИНЦИПУ ПРОИСХОДИТ И СОЛЕВАЯ КОРРОЗИЯ, О КОТОРОЙ Я НЕДАВНО УПОМИНАЛА.

ВОТ КАК?!

ИОНЫ ХЛОРИДА, СОДЕРЖАЩИЕСЯ В ПРИЛЕТАЮЩИХ С МОРЯ ЧАСТИЦАХ СОЛИ, СТАНОВЯТСЯ ПРИЧИНОЙ РАЗРУШЕНИЯ БЕТОНА.



РЯДОМ С БЕРЕГОМ МОРЯ  
ЧАСТО МОЖНО ВЦЕЛЕТЬ  
КОНСТРУКЦИИ,  
РАЗРУШАЮЩИЕСЯ  
ИЗ-ЗА СОЛЕВОЙ КОРРОЗИИ.

В ЧАСТНОСТИ,  
НА БЕРЕГАХ ЯПОНСКОГО МОРЯ  
И НА ОСТРОВАХ ОКИНАВЫ ИЗ-ЗА  
МУССОНОВ И ТАЙФУНОВ, КОТОРЫЕ  
РАЗНОСЯТ МНОГО ЧАСТИЦ СОЛИ,  
СОЛЕВАЯ КОРРОЗИЯ ВЕСЬМА  
ЗНАЧИТЕЛЬНА.

ПОНЯТНО...

ЗНАЧИТ,  
ЕСЛИ МЕСТО УДАЛЕНО  
ОТ МОРЯ, ТО О СОЛЕВОЙ  
КОРРОЗИИ МОЖНО  
НЕ БЕСПОКОИТЬСЯ?

НЕТ, ДАЖЕ НА ВНУТРЕННИХ  
ТЕРРИТОРИЯХ ВОЗНИКАЕТ  
СОЛЕВАЯ КОРРОЗИЯ, ТАК КАК  
ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ХОЛОДНОЕ  
ВРЕМЯ ГОДА НА ДОРОГАХ  
ПРОТИВОЛЁДНЫЕ РЕАГЕНТЫ  
ТОЖЕ СОДЕРЖАТ  
ХЛОРИД-ИОНЫ.

ПОЛУЧАЕТСЯ,  
НУЖНО ЗАРАНЕЕ  
ПРЕДУСМОТРЕТЬ ВЛИЯНИЕ  
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ.

△!

ВОН ТАМ ЕСТЬ  
СВОБОДНАЯ ЛАВОЧКА.  
ДАВАЙТЕ ПРИСЯДЕМ!

А ДАВАЙТЕ!



А ТЕПЕРЬ Я РАССКАЖУ  
О СНИЖЕНИИ ЩЕЛОЧНОСТИ  
В БЕТОНЕ.

ХОРОШО.

## 5.2.2. Нейтрализация



ОСНОВНАЯ ПРИЧИНА  
СНИЖЕНИЯ ЩЕЛОЧНОСТИ -  
ЭТО СОДЕРЖАЩИЙСЯ  
В АТМОСФЕРЕ  
УГЛЕКИСЛЫЙ ГАЗ.

УГЛЕКИСЛЫЙ  
ГАЗ?!

КАК-ТО СОВСЕМ  
УЖ НЕОЖИДААННО...



ЕСЛИ УГЛЕКИСЛЫЙ ГАЗ  
РАСТВОРИТЬ В ВОДЕ,  
ПОЛУЧИТСЯ КИСЛОТА,  
НАЗЫВАЕМАЯ УГОЛЬНОЙ.

ЭТО ТА КИСЛОТА,  
КОТОРАЯ СОДЕРЖИТСЯ  
В ГАЗИРОВКЕ?

АГА.



ГИДРОКСИД КАЛЬЦИЯ,  
СОДЕРЖАЩИЙСЯ В БЕТОНЕ,  
ВСТУПАЕТ В РЕАКЦИЮ  
С УГОЛЬНОЙ КИСЛОТОЙ,  
ОБРАЗУЯ КАРБОНАТ  
КАЛЬЦИЯ.

ПРИ ЭТОМ  
И ТЕРЯЕТСЯ  
ЩЕЛОЧНОСТЬ.

ЭТО ЯВЛЕНИЕ  
НАЗЫВАЕТСЯ  
НЕЙТРАЛИЗАЦИЕЙ  
БЕТОНА.

ЕСЛИ НЕЙТРАЛИЗАЦИЯ  
ПРОГРЕССИРУЕТ,  
ТО ПАССИВИРУЮЩАЯ  
ПЛЁНКА РАЗРУШАЕТСЯ.

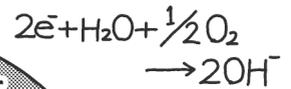
Нейтрализация

НАДО ЖЕ...

КОГДА АРМАТУРА  
НАЧИНАЕТ РЖАВЕТЬ  
ПО ПРИЧИНЕ СОЛЕВОЙ  
КОРРОЗИИ ИЛИ ИЗ-ЗА  
НЕЙТРАЛИЗАЦИИ,  
ТО ВНУТРИ БЕТОНА  
ВОЗНИКАЕТ  
ЭЛЕКТРИЧЕСТВО.

ЧТО?!

ВЫ СЛЫШАЛИ  
ПРО ПРИМЕНЯВШЕЕСЯ РАНЬШЕ  
УСТРОЙСТВО - ВОЛЬТОВ СТОЛЕ?  
ТАМ ТАКОЙ ЖЕ ПРИНЦИП.



Коррозионный ток



Арматура

Ржавчина

$2e^-$

Анод

Катод

ЭТО НАЗЫВАЕТСЯ  
КОРРОЗИОННАЯ БАТАРЕЯ,  
А ТОК НАЗЫВАЕТСЯ  
КОРРОЗИОННЫМ ТОКОМ.



В РЕЗУЛЬТАТЕ  
ЭТОЙ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ  
АРМАТУРА ОКИСЛЯЕТСЯ.

ВОЗМОЖНО,  
ВАМ ПРИХОДИЛОСЬ ВИДЕТЬ  
ВЫГЛЯДЯВШИЕ НАРУЖУ  
ЧАСТИ КРАСНОВАТОЙ АРМАТУРЫ.  
ТАК ВОТ ЭТО - ОКИСЛЕННОЕ ЖЕЛЕЗО -  
РЕЗУЛЬТАТ РЕАКЦИИ ОКИСЛЕНИЯ.

ТАК ВОТ ЧТО ЭТО БЫЛО...

ОКИСЛЕННОЕ ЖЕЛЕЗО  
К ТОМУ ЖЕ УВЕЛИЧИВАЕТСЯ  
В ОБЪЕМЕ, ЧТО ПРИВОДИТ  
К ОБРАЗОВАНИЮ ТРЕЩИН  
В БЕТОНЕ,  
ЧЕРЕЗ КОТОРЫЕ НАРУЖУ  
НАЧИНАЕТ ПРОГЛЯДЫВАТЬ  
АРМАТУРА. ВСЁ ЭТО ПРИВОДИТ  
К РАЗРУШЕНИЮ БЕТОНА.

ПОНЯТНО...

### 5.3. СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ ОТ КОРРОЗИИ АРМАТУРЫ

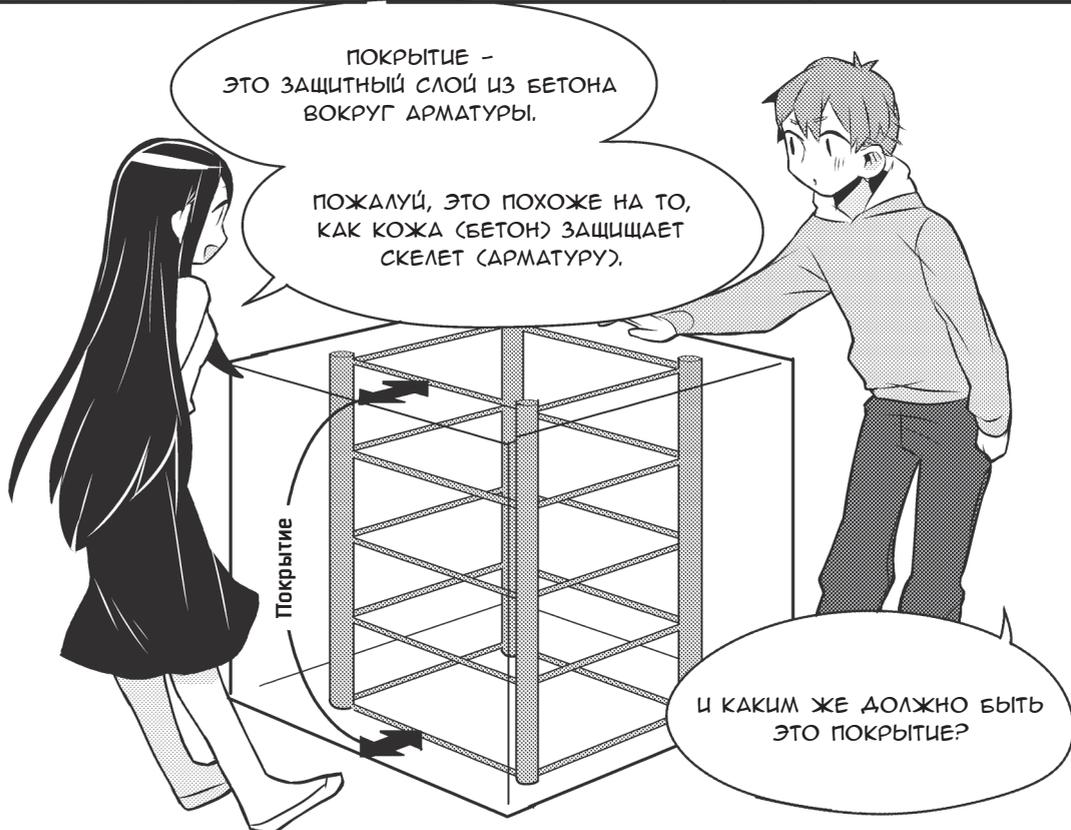
А КАК МОЖНО ПРЕДОТВРАТИТЬ КОРРОЗИЮ АРМАТУРЫ?



ДЛЯ ЭТОГО ОЧЕНЬ ВАЖНО ПОКРЫТИЕ.

ПОКРЫТИЕ?!

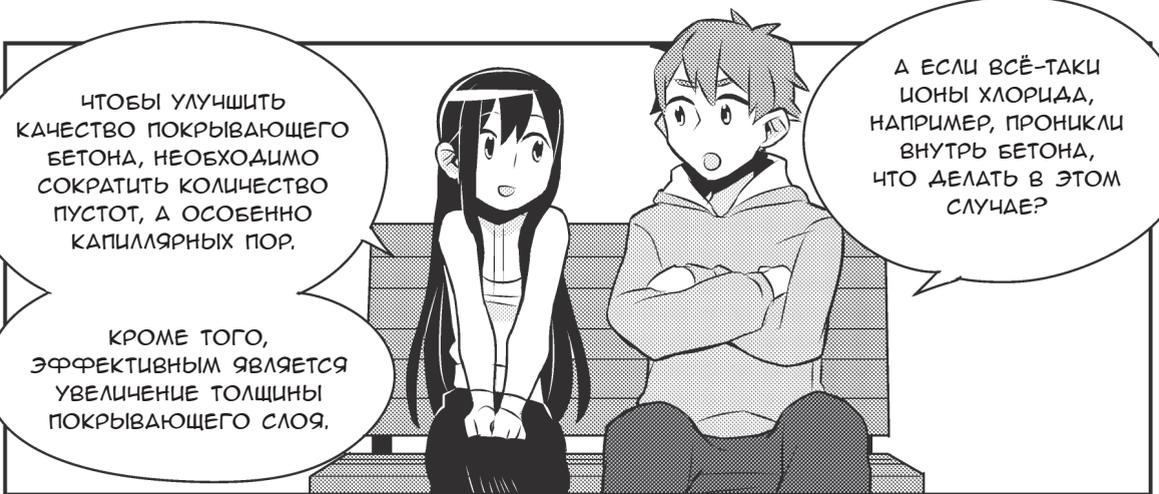
...А ЧТО ЭТО?



ЕСЛИ КАЧЕСТВО ПОКРЫВАЮЩЕГО БЕТОНА ХОРОШЕЕ, ТО СКОРОСТЬ ПОПАВШИХ ВНУТРЬ ВЕЩЕСТВ (ИОНОВ ХЛОРИДА И/ИЛИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА) СТАНОВИТСЯ МЕДЛЕННОЙ. ТАКИМ ОБРАЗОМ ПОКРЫТИЕ ЗАЩИЩАЕТ АРМАТУРУ ОТ КОРРОЗИИ.



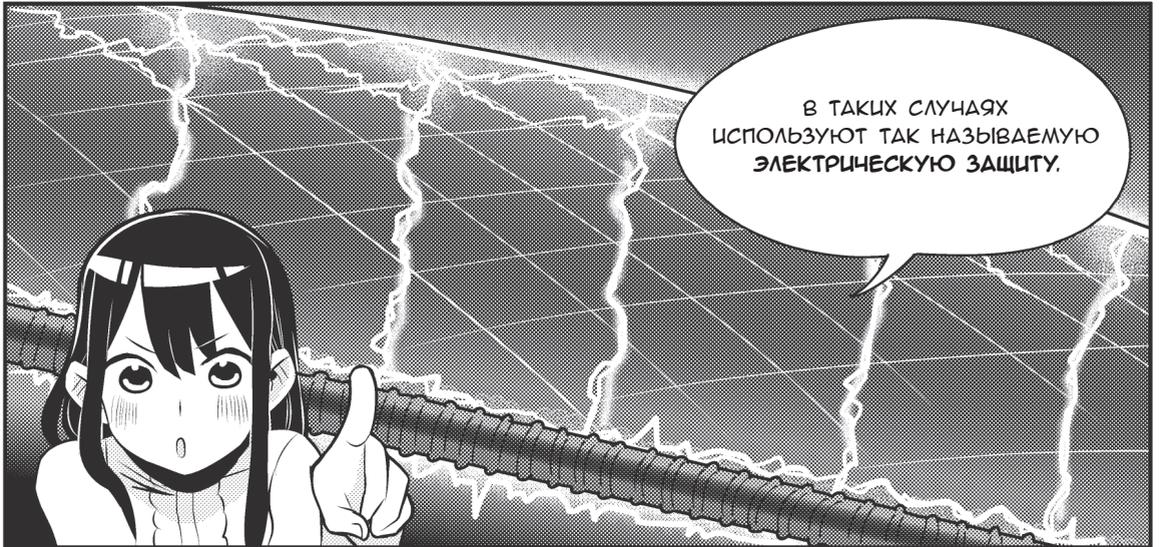
ВСЁ-ТАКИ ВСЁ УПИРАЕТСЯ В КАЧЕСТВО БЕТОНА, НЕ ТАК ЛИ?



ЧТОБЫ УЛУЧШИТЬ  
КАЧЕСТВО ПОКРЫВАЮЩЕГО  
БЕТОНА, НЕОБХОДИМО  
СОКРАТИТЬ КОЛИЧЕСТВО  
ПУСТОТ, А ОСОБЕННО  
КАПИЛЛЯРНЫХ ПОР.

КРОМЕ ТОГО,  
ЭФФЕКТИВНЫМ ЯВЛЯЕТСЯ  
УВЕЛИЧЕНИЕ ТОЛЩИНЫ  
ПОКРЫВАЮЩЕГО СЛОЯ.

А ЕСЛИ ВСЁ-ТАКИ  
ИОНЫ ХЛОРИДА,  
НАПРИМЕР, ПРОНИКЛИ  
ВНУТРЬ БЕТОНА,  
ЧТО ДЕЛАТЬ В ЭТОМ  
СЛУЧАЕ?



В ТАКИХ СЛУЧАЯХ  
ИСПОЛЬЗУЮТ ТАК НАЗЫВАЕМУЮ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ЗАЩИТУ.



*Звучит круто...*

А ЧТО ЭТО ЗА СПОСОБ?



ИСПОЛЬЗУЕТСЯ ПРИНЦИП,  
ОБРАТНЫЙ ДЕЙСТВИЮ  
КОРРОЗИОННОЙ БАТАРЕЙКИ:  
ЭЛЕКТРИЧЕСТВО НАПРАВЛЯЮТ  
В ПРОТИВОПОЛОЖНУЮ  
СТОРОНУ К ТОЙ, КУДА ОНО  
ДВИЖЕТСЯ ПРИ КОРРОЗИИ,  
И ТАКИМ ОБРАЗОМ КОРРОЗИЯ  
ЗАМЕДЛЯЕТСЯ.

## 5.4. РАЗРУШЕНИЕ САМОГО БЕТОНА

А ТЕПЕРЬ ПОГОВОРИМ  
О РАЗРУШЕНИИ  
САМОГО БЕТОНА.

Щёлочно-силикатная  
реакция  
(щелочная реакция  
заполнителей)

ОДНА ИЗ ПРИЧИН  
РАЗРУШЕНИЯ - ТАК НАЗЫВАЕМАЯ  
**ЩЁЛОЧНО-СИЛИКАТНАЯ РЕАКЦИЯ**  
(ЩЕЛОЧНАЯ РЕАКЦИЯ  
ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ).

А ЧТО ЭТО  
ЗА РЕАКЦИЯ?

ПО ПРОШЕСТВИИ ДОВОЛЬНО  
ДЛИТЕЛЬНОГО ВРЕМЕНИ  
СОДЕРЖАЩАЯСЯ В ЦЕМЕНТЕ ЩЁЛОЧЬ  
НАЧИНАЕТ ВСТУПАТЬ В ХИМИЧЕСКУЮ  
РЕАКЦИЮ С ЗАПОЛНИТЕЛЯМИ,  
ЧТО ПРИВОДИТ К АНОМАЛЬНОМУ  
РАСШИРЕНИЮ.

ОГО!

В РЕЗУЛЬТАТЕ В БЕТОНЕ  
ПОЯВЛЯЮТСЯ БЕСПОРЯДОЧНЫЕ  
ТРЕЩИНЫ, ЧТО ВЕДЁТ  
К РАЗРУШЕНИЮ БЕТОНА.



КРОМЕ ТОГО, ЕСЛИ БЕТОН  
НЕСКОЛЬКО РАЗ ИСПЫТЫВАЕТ  
ЗНАЧИТЕЛЬНЫЕ ПЕРЕПАДЫ  
ТЕМПЕРАТУРЫ, ЭТО ТОЖЕ  
ПРИВОДИТ К ПОСТЕПЕННОМУ  
РАЗРУШЕНИЮ СТРУКТУРЫ  
БЕТОНА.

Она снова  
это делает!



ЭТО ЯВЛЕНИЕ  
НАЗЫВАЕТСЯ ВОЗДЕЙСТВИЕМ  
ЗАМОРОЗКИ/ОТТАИВАНИЯ.



ВОТ КАК!

ЭТО ПОТОМУ, ЧТО  
КОГДА ВОДА  
ПРЕВРАЩАЕТСЯ В ЛЁД,  
ЕЁ ОБЪЁМ УВЕЛИЧИВАЕТСЯ,  
ТАК?

ИМЕННО!



ВЛАГА,  
НАХОДЯЩАЯСЯ ВНУТРИ  
ЗАТВЕРДЕВШЕЙ ЧАСТИ ЦЕМЕНТА,  
ПОСТОЯННО ТО ЗАМЕРЗАЯ, ТО ОТТАИВАЯ,  
ПОВРЕЖДАЕТ ТОНКУЮ  
ВНУТРЕННЮЮ СТРУКТУРУ  
БЕТОНА.

ЗНАЧИТ,  
В РЕГИОНАХ С ХОЛОДНЫМИ  
ЗИМАМИ НЕОБХОДИМО  
УЧИТЫВАТЬ ЕЩЁ И ВОЗДЕЙСТВИЕ  
ЗАМОРОЗКИ/ОТТАИВАНИЯ.



ЭФФЕКТИВНЫМ СПОСОБОМ ЗАЩИТЫ БЕТОНА ОТ НЕГАТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЗАМОРОЗКИ/ОТТАИВАНИЯ ЯВЛЯЕТСЯ ДОБАВЛЕНИЕ В БЕТОН СПЕЦИАЛЬНЫХ ВОЗДУШНЫХ ПУЗЫРЬКОВ.

РОЛЬ ЭТИХ ВОЗДУШНЫХ ПУЗЫРЬКОВ ЗАКЛЮЧАЕТСЯ В ОСЛАБЛЕНИИ ДАВЛЕНИЯ, ВОЗНИКАЮЩЕГО ПРИ ЗАМОРОЗКЕ ВОДЫ.



ЧТОБЫ ДОБАВИТЬ ВОЗДУШНЫЕ ПУЗЫРЬКИ В БЕТОН, ИСПОЛЬЗУЮТ ВОЗДУХОВОВЛЕКАЮЩИЕ ДОБАВКИ (АЕ-ДОБАВКИ, AIR ENTRAINED)!

КАКАЯ ПОЛЕЗНАЯ ДОБАВКА!

**ТА-ДАМ!**



ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НАТУРАЛЬНЫХ КИСЛОТ БЫВАЕТ, ЧТО БЕТОН ПЛАВИТСЯ ИЛИ ЧТО ПРОИСХОДИТ РЕАКЦИЯ, ВСЛЕДСТВИЕ КОТОРОЙ ВОЗНИКАЮТ РАСШИРЯЮЩИЕ ВЕЩЕСТВА.

ТАКЖЕ РАЗРУШИТЕЛЬНЫЕ ДЛЯ БЕТОНА ЯВЛЕНИЯ НАЗЫВАЮТСЯ ХИМИЧЕСКОЙ ЭРОЗИЕЙ.



А ПРИ КАКИХ ЖЕ УСЛОВИЯХ ТАКОЕ МОЖЕТ СЛУЧИТЬСЯ?



НАПРИМЕР, В МЕСТАХ  
С ГОРЯЧИМИ ИСТОЧНИКАМИ  
БЕТОН МОЖЕТ ПОДВЕРГАТЬСЯ  
ДЕЙСТВИЮ ВЫСОКОТЕМПЕРА-  
ТУРНЫХ КИСЛОТ (НАПРИМЕР,  
СЕРНОЙ КИСЛОТЫ).

И БЫВАЕТ, ЧТО БЕТОН  
ОТ ЭТОГО ПЛАВИТСЯ. ПОЭТОМУ  
В ТАКИХ МЕСТАХ НЕОБХОДИМО  
ПРЕДПРИНИМАТЬ  
ЗАЩИТНЫЕ  
МЕРЫ.

А ТАК КАК  
В ЯПОНИИ МНОГО  
ГОРЯЧИХ ИСТОЧНИКОВ, ТО И  
ТАКИХ МЕСТ, НУЖДАЮЩИХСЯ  
В КОНТРЕРАХ, ДОВОЛЬНО  
МНОГО.



ОХ,  
КАК ЗАГОВОРИЛА  
О ГОРЯЧИХ ИСТОЧНИКАХ,  
ТАК СРАЗУ ЗАХОТЕЛОСЬ  
ТУДА ПОЕХАТЬ!

НО ЭТО  
Я ОТКЛОНИЛАСЬ  
ОТ ТЕМЫ БЕТОНА...

И-ИСТОЧНИКИ?!



**БУЛТЯХ!**



А-ДАВАЙТЕ  
НЕПРЕМЕННО  
ПОЕДЕМ!

С ВАМИ, СИБИЛ,  
Я ГОТОВ ЕХАТЬ  
КУДА УГОДНО!



ТАК, СЕЙЧАС САМЫЙ  
ПОДХОДЯЩИЙ МОМЕНТ, ЧТОБЫ  
РАССКАЗАТЬ СИБИЛ О МОИХ ЧУВСТВАХ  
И УЗНАТЬ, ЧТО ОНА ДУМАЕТ ОБО МНЕ!  
СЕЙЧАС Я МОГУ ЭТО СДЕЛАТЬ!





АГА, НАШЁЛ!!!

СЫБИЛ,  
Я ТЕБЯ ИСКАЛ!!!



ТО-ТО Я СМОТРУ,  
ЧТО ВСЁ СВОБОДНОЕ ВРЕМЯ  
ТЫ ГАЕ-ТО ПРОПАДАЕШЬ.

Я ПОРАСПРОСИЛ  
СОТРУДНИКОВ ФИРМЫ  
И ВОТ, НАКОНЕЦ,  
ПРИШЁЛ ЗА ТОБОЙ!

.....



КСТАТИ,  
А ТЫ КТО ТАКОЙ?

**УХМЫЛКА**



МЕНЯ ЗОВУТ  
СУНАХАРА КЕНДЗИ,  
Я СТУДЕНТ  
ПЕРВОГО КУРСА  
АРХИТЕКТУРНОГО  
ФАКУЛЬТЕТА.  
МЫ С СИБИЛ О БЕТОНЕ...

НУ,  
ЭТО ВСЁ

СОВЕРШЕННО  
НЕ ВАЖНО.



НА ВСЯКИЙ СЛУЧАЙ  
ИМЕЙ В ВИДУ,  
ЧТО СИБИЛ -  
МОЯ НЕВЕСТА.

НЕ-НЕВЕСТА?



Я - БУДУЩИЙ ДИРЕКТОР  
АРХИТЕКТУРНОЙ ФИРМЫ,  
ОНА - ХАРИЗМАТИЧНАЯ  
ДЕВУШКА, ЛЮБИТЕЛЬНИЦА  
БЕТОНА!  
РАЗВЕ МЫ НЕ ОТЛИЧНАЯ ПАРА?



ТАК ЧТО ТЕБЯ,  
ПРОСТОГО СТУДЕНТА,  
ТУТ НИКТО НЕ ЗВАЛ!

НУ, ПОЙДЁМ ЖЕ  
УЖИНАТЬ, СИБИЛ!



... !!



**ХВАТЬ**



ПОЖАЛУЙСТА,  
ПОДОЖДИТЕ!!!



КОЛЬ  
ВНИМАНИЕ



Я...

Я ЛЮБЛЮ СЕБИИ!!!



ЧТО?!

ОХ!



ТВОИ ЧУВСТВА  
НИКОГО  
НЕ ИНТЕРЕСУЮТ...

ИНТЕРЕСУЮТ!



МЕНЯ

ИНТЕРЕСУЮТ!

ЭТО ЕЩЕ  
ЧТО?!



НАСЧЁТ ПОМОЛВКИ  
ЭТО НАШИ РОДИТЕЛИ РЕШИЛИ  
ЗА НАС МНОГО ЛЕТ НАЗАД!

НО У МЕНЯ ДОЛЖНО БЫТЬ  
ПРАВО ВЫБОРА!

ЧТО ТЫ ТАКОЕ  
ГОВОРИШЬ?  
РАЗВЕ МОЖНО  
МЕНЯ СРАВНИВАТЬ  
С ЭТИМ ПАРНЕМ?

ХА-ХА-ХА



В ТАКОМ СЛУЧАЕ  
У МЕНЯ ЕСТЬ  
ОДНО УСЛОВИЕ...



УСЛОВИЕ?



ЕСЛИ ВЫ НЕ ПРОТИВ,  
Я БЫ ХОТЕЛА, ЧТОБЫ ВЫ  
ПОСОРЕВНОВАЛИСЬ ДРУГ  
С ДРУГОМ В ОДНОМ ДЕЛЕ...



АХ-ХА...

НЕ ВОПРОС!

ЧТОБЫ ЭТО НИ БЫЛО,  
ЭТОМУ СТУДЕНТИКУ  
Я НЕ УСТУПЛЮ.



Я ТОЖЕ  
НЕ ВОЗРАЖАЮ!!!



БОЛЬШОЕ  
СПАСИБО...

ТОГДА  
НА СЛЕДУЮЩЕЙ  
НЕДЕЛЕ ДАВАЙТЕ  
ВСТРЕТИМСЯ  
В АЭРОПОРТУ  
ХАНЕДА.



ХАНЕДА?

ЧТО Ж,  
ХОРОШО.



О-ОТЛИЧНО!



**ТУ-ДУ-**

**ДУ-**



**ДУМ!**

## ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

### Долговечность бетонных конструкций

Изначально бетон – это устойчивый к физическим и химическим воздействиям, обладающий отличной износостойкостью материал. Железобетон также защищен от разрушения, так как находящаяся внутри бетона арматура устойчива к ржавчине. Это происходит потому, что в бетоне формируется сильная щелочная среда, которая создаёт на поверхности железа оксидную плёнку, называемую **пассивирующей плёнкой**. Однако если качество бетона ухудшается, то в короткие сроки бетонная конструкция начинает разрушаться. Кроме того, если бетонное сооружение находится в суровых условиях окружающей среды, то разрушение будет происходить ещё быстрее, поэтому необходимо предпринимать защитные меры. Причины разрушения бетонных конструкций можно разделить на две части: связанные с коррозией арматуры внутри конструкции и разрушение непосредственно самого бетона.

### Коррозия арматуры

При столкновении с ионами галогенов (например, с ионами хлорида) или при снижении щёлочности в среде вокруг железа разрушается пассивирующая плёнка, защищающая железо от коррозии. Если же пассивирующая плёнка исчезает, то при наличии определённого количества влаги и кислорода происходит химическая реакция (окисление железа, коррозия). При этом внутри бетона возникает электрическая цепь, называемая коррозионной батареей (рис. 5.1). Образуются анодная часть, когда ионы арматуры проникают в пустоты, заполненные водой, и катодная часть, где восстанавливается кислород и возникают гидроксид-ионы. И электрический ток начинает течь через арматуру, которая является хорошим проводником.

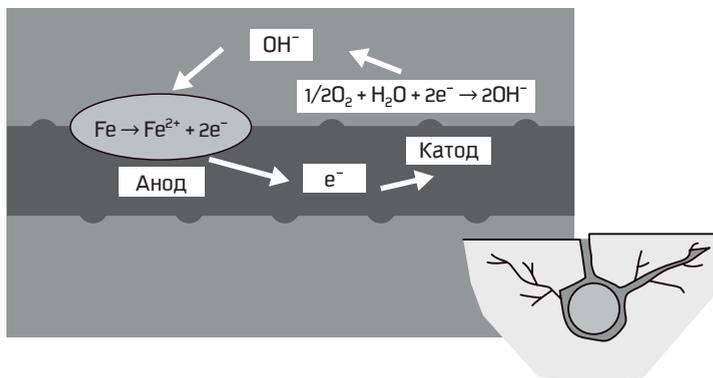


Рис. 5.1. Формирование коррозионной батареи

По форме коррозию металла делят на микроэлементную и макроэлементную. Микроэлементная коррозия образуется при формировании электрической цепи, в которой анод и катод расположены довольно близко, и тогда коррозия распределена равномерно по всей поверхности арматуры. С другой стороны, при макроэлементной коррозии анод и катод расположены относительно далеко друг от друга, и степень коррозии в разных местах арматуры разная. Макроэлементная коррозия возникает тогда, когда количество ионов хлорида, уровень влажности и количество кислорода вокруг арматуры распределены неравномерно. Например, если в каком-то месте скопилось большое количество ионов хлорида, то эта область становится анодом, а область с достаточным количеством влаги и кислорода становится катодом, и анод и катод расположены на значительном расстоянии друг от друга, в результате образуется крупномасштабная электрическая цепь. В общем случае макроэлементная коррозия происходит с большей скоростью, чем микроэлементная.

При окислении железа образуется оксид  $Fe_2O_3$ . Это то, что называется ржавчиной, обычно встречающийся в арматуре бетона оксид железа. В плотных структурах негидратированный  $Fe_2O_3$  увеличивается по объёму в 2 раза по сравнению с неокисленным железом. С другой стороны, при наличии продуктов гидратации оксид становится пористым, и его объём может увеличиваться в 10 раз по сравнению с первоначальным. При увеличении объёма вокруг арматуры создается давление, которое служит причиной образования трещин в бетонном покрытии (коррозионные трещины) и в конце концов приводит к разрушению покрытия. А если появляются коррозионные трещины, то скорость проникновения ионов хлорида, влаги и кислорода увеличивается, что приводит к ещё большей коррозии (рис. 5.2).



*Рис. 5.2. Пример солевой коррозии железобетонной конструкции*

## Процесс разрушения

На рис. 5.3 схематично показаны этапы ухудшения механических характеристик (например, несущей способности) бетонной конструкции (элементов) вследствие возникновения трещин, которые, в свою очередь, появляются по причине коррозии арматуры. Здесь приведён пример солевой коррозии. В стандартной спецификации бетона научного общества гражданского строительства Японии выделены следующие этапы развития разрушения: инкубационный период, период развития, период ускорения и период разрушения<sup>1</sup>.

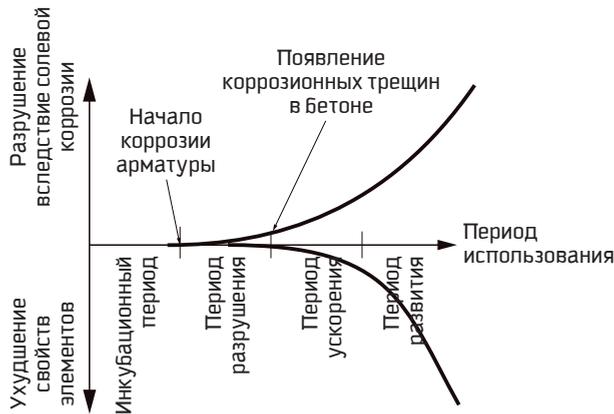


Рис. 5.3. Схема развития процесса разрушения<sup>1</sup>

В инкубационном периоде целостность внутренней арматуры сохраняется. В случае солевой коррозии ионы хлорида постоянно проникают внутрь бетона, но благодаря защитному покрытию арматуры они не сразу добираются до самой арматуры. Следовательно, прежде чем начнётся коррозия, нужно время для накопления достаточного количества ионов хлорида. Это время и называется инкубационным периодом. Это похоже на то, когда организм уже заражён инфекцией, но болезнь себя ещё не проявила. Если посмотреть на бетонную конструкцию в инкубационный период, то никаких изменений не будет заметно.

Если же поступление ионов хлорида извне постоянно продолжается и количество ионов хлорида превышает определённый порог, то они начинают проникать через покрытие в арматуру, и начинается коррозия арматуры. Этот этап называется периодом развития. Пороговое значение концентрации ионов хлорида, после которого начинается коррозия арматуры, называется предельной концентрацией ионов хлорида для возникновения коррозии. Что касается предельной концентрации ионов хлорида, то она определяется на основании раз-

<sup>1</sup> Научное общество гражданского строительства Японии. Стандартная спецификация бетона (Техобслуживание). 2007.

личных исследований прошлого, но также известно, что предельная концентрация зависит от соотношения числа молей коррозионных ионов  $\text{Cl}^-$  и антикоррозионных ионов  $\text{OH}^-$ , другими словами, от соотношения  $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$  в поровой жидкости бетона. В стандартной спецификации бетона научного общества гражданского строительства Японии установлено безопасное предельное значение 1,2 (кг/м<sup>3</sup>), полученное на основании экспериментов в реальных условиях. Оно означает, что если в куске бетона объёмом 1 м<sup>3</sup> содержится более чем 1,2 кг ионов хлорида, то начнётся коррозия арматуры.

В период ускорения в бетонном покрытии образуются коррозионные трещины. Из-за коррозии арматуры объём окисленного железа (ржавчины) увеличивается по сравнению с исходным объёмом, из-за чего возникает давление, и в бетонном покрытии возникает сила растяжения. Затем возникают пузырьки, шелушение на бетонной поверхности, а потом дело доходит и до трещин. Пузырьки и шелушение могут быть незаметными для глаз, но состояние бетона можно легко определить, простукивая его поверхность молотком. При простукивании цельного крепкого бетона звук будет высокий и чистый, если же в бетоне есть пузырьки и шелушение, то звук получится глухим.

Если же в появившихся трещинах невооруженным глазом видны красноватые, как чай, частицы, то это означает, что арматура внутри заржавела.

Период разрушения характеризуется значительным снижением качества частей конструкции по причине коррозии арматуры и/или ухудшения качества бетона из-за коррозионных трещин. Если коррозия прогрессирует так, что дефекты видны в сечении, то арматура становится неспособной выдерживать силу растяжения, что приводит к уменьшению её несущей способности. Кроме того, если появляются коррозионные трещины, то теряется единство арматуры и бетона, что приводит к значительному ухудшению несущей способности конструкции.

Способы ухода за бетоном, пострадавшим от коррозии:

- метод восстановления сечения;
- метод ремонта поверхности;
- метод электролитической защиты;
- метод обессоливания;
- метод повторного ощелачивания.

Метод восстановления сечения заключается в удалении содержащего ионы хлорида и/или нейтрализованного бетона и восстановлении удалённых частей ремонтными смесями, так называемыми безусадочными цементными растворами или полимерцементными растворами. Цель этих работ – предотвратить повторное проникновение в бетон разрушающих веществ вроде ионов хлорида, углекислого газа или воды. При проведении работ по восстановлению сечения следует быть внимательным, чтобы различие в количестве хлорид-ионов и влажности в разных частях конструкции не привело к возникновению макроэлементной коррозии.

Метод ремонта поверхности включает в себя метод покрытия поверхности и метод пропитки поверхности. Оба метода обеспечивают защиту поверхности бетона от проникновения разрушающих веществ. Метод покрытия заключается в покрытии поверхности бетона специальными смолами или полимерцементом. Метод пропитки подразумевает пропитку поверхности бетона силикатными или силикатными пропиточными смесями, чтобы уплотнить структуру поверхностного слоя бетона и затруднить проникновение вредных веществ.

Метод электролитической защиты (метод электрохимической защиты) подразумевает уничтожение коррозионной батарейки, образовавшейся из-за коррозии арматуры. Электрохимическая защита включает в себя метод внешнего источника тока и метод анодной защиты. Метод внешнего источника тока позволяет подавлять коррозию посредством установления источника постоянного тока, который обеспечит непрерывное поступление антикоррозийного тока к арматуре. Анодная же защита использует разницу в тенденции к ионизации (склонность к коррозии). Другими словами, используя более склонный к ионизации материал вроде цинка (так называемый жертвенный анод), создают новую электрическую цепь, подавляя коррозию арматуры.

Метод обессоливания заключается в установлении на поверхности бетона анода, содержащего раствор электролита, и пропускании постоянного тока через арматуру, используемую в качестве катода. Находящиеся в бетоне ионы хлорида будут выходить на поверхность (положительно заряженную), так как сами имеют отрицательный заряд. Таким образом можно избавиться от находящихся внутри ионов хлорида. А при методе повторного ощелачивания устанавливают анод с щелочным раствором и, подобно методу обессоливания, пропускают ток, используя арматуру внутри бетона в качестве катода. Положительно заряженные ионы щелочи проникают внутрь бетона, таким образом обеспечивая повторное ощелачивание бетона.

## **Проникновение хлорид-ионов внутрь бетона**

Береговая линия Японии очень длинная, и довольно многие социально значимые объекты, такие как здания, автодороги, железные дороги, аэропорты, порты и т. д., находятся в непосредственной близости от моря или океана. Такие объекты, как верфи, автодороги вдоль побережья, понтонные мосты, подводные туннели, непосредственно соприкасаются с морской водой, что приводит к проникновению ионов хлорида внутрь конструкций и становится причиной солевой коррозии. Но и объекты, находящиеся на небольшом расстоянии от побережья, тоже страдают от солевой коррозии. Потому что частицы соли от волн разносятся ветром и оседают на поверхности конструкций. Эти частицы соли очень маленькие, диаметром несколько десятков микрометров, и поэтому они могут разноситься ветром на большие расстояния.

В Японии особенно много таких летающих частиц соли на побережье Японского моря и на Окинаве. На побережье Японского моря зимой обычно дуют сезонные ветра с запада, что приводит к большому количеству частиц соли, оседающих на бетонных конструкциях. На Окинаве же частицы соли в больших количествах разносятся тайфунами, которых особенно много летом.

Ионы хлорида после попадания на поверхность бетона начинают постепенно проникать внутрь. Бетон – это пористый материал с пустотами размерами от нанометров (нм – 1/1000 мкм) до микрометров (мкм – 1/1000 мм). Сравнительно большие капиллярные поры, измеряемые в микрометрах, становятся путём для проникновения ионов хлорида. Если капиллярных пор много, то ионы хлорида быстро проникают внутрь бетона. Что приводит к ранней коррозии арматуры.

Существует два механизма: так называемая **диффузия** и **адвекция**, – которые управляют распределением ионов хлорида в бетоне. Диффузия означает перемещение вещества из областей с более высокой концентрацией в места с меньшей концентрацией. Это явление наиболее просто описывается первым законом Фика, который можно выразить следующей формулой:

$$J = -D\nabla C. \quad (1)$$

Здесь  $J$  – это поток вещества, т. е. количество вещества, проходящее через единицу площади в единицу времени.  $D$  – это так называемый коэффициент диффузии, значит, поток вещества пропорционален разнице в концентрации  $C$  ( $\nabla C$  – градиент концентрации). Если в бетоне скорость перемещения ионов хлорида высокая, то и коэффициент диффузии будет высоким. А значит, в бетоне с довольно большими пустотами вроде капиллярных пор коэффициент диффузии будет большим. И наоборот, в бетоне с плотной микроструктурой коэффициент диффузии будет маленьким. Когда внутренняя часть бетона влажная и многие пустоты заполнены частицами воды, то растворённые в воде ионы хлорида начинают распространяться благодаря механизму диффузии. Это явление и описывается формулой (1).

Теперь объясним явление адвекции. Если бетонная конструкция подвергается многократной сушке и увлажнению, то в ней над диффузией начинает преобладать механизм адвекции. Если высохший бетон попадает под воздействие солёной воды, то сам бетон начинает адсорбировать эту солёную воду. В этом случае вместе с поглощённой водой внутрь бетона переносятся и ионы хлорида. Это явление и называется **проникновением ионов хлорида путём адвекции**. В тех случаях, когда бетон то увлажняется морской водой, то высыхает (например, из-за приливов и отливов), на бетон воздействуют как солёная вода, так и частицы соли в воздухе, и ионы хлорида проникают внутрь бетона с помощью обоих механизмов: и диффузии, и адвекции.

Итак, раз солевая коррозия наносит такой вред бетонным конструкциям, как же можно предотвратить её в новых постройках? В стандартной спецификации бетона [Проектирование] определена схема проверки конструкции, чтобы в течение предполагаемого срока службы процесс коррозии оставался в инкубационном периоде (не переходил в стадию развития)<sup>1</sup>. Например, рассмотрим бетонную конструкцию, которая будет использоваться в течение 100 лет. Проект этой конструкции должен предусматривать, чтобы в данных условиях окружающей среды по прошествии 100 лет концентрация ионов хлорида в арматуре не достигнет концентрации, вызывающей коррозию. Такой метод проектирования, когда указывается планируемый период использования конструкции и осуществляется проверка показателей долговечности, чтобы они удовлетворяли этому периоду, называется **методом проектирования с учетом сроков и условий эксплуатации конструкции**. В публикации 2007 года в качестве стандартного метода проверки показателей долговечности отмечен следующий:

$$C_d = \gamma_{cl} \cdot C_0 \left( 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{0,1 \cdot c}{2\sqrt{D_d \cdot t}} \right) \right). \quad (2)$$

Здесь  $C_0$  – концентрация ионов хлорида на поверхности бетона ( $\text{кг/м}^3$ );  $t$  – период использования относительно проникновения ионов хлорида (годы);  $D_d$  – коэффициент диффузии ионов хлорида ( $\text{см/год}$ );  $c$  – толщина покрытия ( $\text{мм}$ );  $\gamma_{cl}$  – коэффициент безопасности, учитывающий варьирование значения концентрации  $C_d$  ионов хлорида на арматуре;  $\operatorname{erf}$  – так называемая функция ошибок. Формула (2) демонстрирует решение для одномерного закона диффузии Фика (Второй закон Фика). Хотя, как было упомянуто ранее, ионы хлорида на самом деле распространяются внутри бетона не только методом диффузии, но и методом адвекции. Чтобы упростить задачу для описания явления, используется технический метод, выраженный формулой (2). Чтобы не путаться с диффузией как физическим явлением, вызванным градиентом концентрации,  $D_d$  называют **кажущимся коэффициентом диффузии**.

Концентрация ионов хлорида на поверхности бетона зависит от условий окружающей среды, в которых находится конструкция. В стандартной спецификации бетона представлена табл. 5.1, основанная на фактических измерениях. С её помощью можно легко получить проектное решение, используя формулу (2). Как видно, чем меньше расстояние от морского побережья и чем больше содержание соли в воздухе данного региона, тем больше ионов хлорида на поверхности бетона. И естественно, чем больше ионов хлорида на поверхности, тем больше ионов хлорида проникнет внутрь бетона.

<sup>1</sup> Научное общество гражданского строительства Японии. Стандартная спецификация бетона (Проектирование). 2007.

Кажущийся коэффициент диффузии  $D_d$  в формуле (2) показывает, насколько легко или трудно ионам хлорида проникать внутрь бетона. Чем ниже водоцементное соотношение, чем плотнее бетон, и чем лучше была проведена выдержка бетона, тем ниже коэффициент  $D_d$ . И если коэффициент  $D_d$  низкий, то при одинаковых условиях окружающей среды и для одинакового срока эксплуатации покрытие можно делать меньше, а значит, сама конструкция будет экономичнее.

**Таблица 5.1. Концентрация ионов хлорида  $C_0$  на поверхности бетона (кг/м<sup>3</sup>)**

		Зона брызг	Расстояние от побережья (км)				
			рядом с береговой линией	0,1	0,25	0,5	1,0
Регионы Японии с большим количеством частиц соли в воздухе	Хоккайдо, Тохоку, Хокурику, Окинава	13,0	9,0	4,5	3,0	2,0	1,5
Регионы Японии с малым количеством частиц соли в воздухе	Канто, Токай, Кинки, Тюгоку, Сикоку, Кюсю		4,5	2,5	2,0	1,5	1,0

## Нейтрализация бетона (карбонизация)

Когда содержащийся в атмосфере углекислый газ попадает внутрь бетона, то он растворяется в воде, содержащейся в пустотах, и образует угольную кислоту (рис. 5.4). Растворённый в воде углекислый газ превращается в карбонат-ионы, которые, вступая в реакцию с ионами кальция, также растворёнными в содержащейся в пустотах воде, образуют карбонат кальция. При этом в основном расходуется гидроксид кальция, имеющий самую высокую растворимость среди продуктов гидратации цемента. С точки зрения химии, реакция карбонизации – это реакция нейтрализации между водным раствором гидроксида кальция, являющимся сильным основанием, и угольной кислотой, являющейся слабой кислотой. Следовательно, при расходовании гидроксида кальция из-за карбонизации снижается рН в поровой жидкости. И так как щелочная среда в бетоне начинает меняться на нейтральную, явление карбонизации называют **нейтрализацией**. И хотя из находящихся в окружающей среде кислот не только угольная кислота может влиять на бетон, но и, например, серная кислота из горячих источников или азотная кислота из кислотных дождей, всё же, когда речь идёт о нейтрализации, в общем случае подразумевается именно реакция карбонизации.

С точки зрения термодинамики реакция карбонизации является прогрессирующей. Другими словами, в среде, где присутствует углекислый газ, карбонат кальция имеет более низкую свободную энергию, чем гидроксид кальция, и поэтому это более стабильное соединение. При обжиге цемента из известняка (карбонат кальция) удаляется  $CO_2$  (он выделяется в процессе горения), и получается цемент (клинкерные минералы, например оксид кальция). Можно ска-

зять, что реакция карбонизации возвращает цемент в состояние до обжига (известняк), потому что выделяющийся при производстве цемента  $\text{CO}_2$  постоянно восполняется из атмосферы.

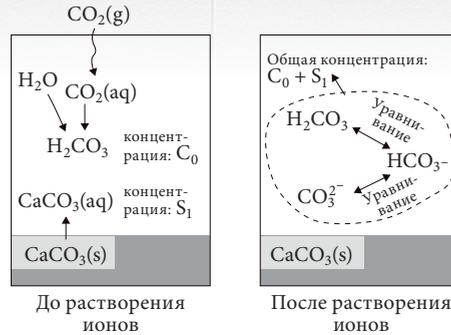


Рис. 5.4. Растворение и ионное равновесие углекислого газа в поровой жидкости

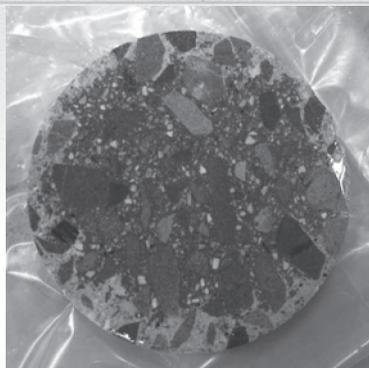
Нейтрализация бетона, вызывающая коррозию арматуры внутри железобетонной конструкции, признана серьёзной проблемой с точки зрения обеспечения долговечности конструкции. В Японии самые ранние исследования взаимосвязи нейтрализации бетона и коррозии арматуры начались в 1907 году под руководством доктора наук Тосиката Сано<sup>1</sup>. Этот проект, для которого были произведены сотни образцов, можно считать новаторским исследованием прочности конструкций. Начатые доктором Сано исследования были продолжены докторами Ёсикадзу Утида и Минору Хамада, которые разработали теорию влияния водоцементного соотношения на процесс нейтрализации<sup>2</sup>.

Чтобы получить результаты исследований влияния нейтрализации на прочность бетона в естественных условиях окружающей среды, требуется много времени, поэтому часто проводят в лабораторных условиях так называемые тесты ускоренной нейтрализации. При ускоренной нейтрализации тестируемый бетон помещают в среду с высокой концентрацией углекислого газа и смотрят, насколько нейтрализация проникает с поверхности бетона (глубина нейтрализации).

Обычно для оценки глубины нейтрализации используют раствор фенолфталеина. Раствор фенолфталеина становится розовым в щелочной среде и бесцветным в нейтральной среде. Поэтому тестируемый объект расщепляют, наносят фенолфталеин и по полученному цвету на срезе определяют, какие области подверглись нейтрализации (рис. 5.5).

<sup>1</sup> Сано Тосиката. Тестирование коррозии арматуры (1-й отчёт) // Отчёт об исследованиях по защите от землетрясений. 1911. № 74.

<sup>2</sup> Утида Ёсикадзу, Хамада Минору. Исследования на прочность железа и бетона // Архитектурный журнал. 1928. № 516. С. 1287–1303.



*Рис. 5.5. Определение глубины нейтрализации с помощью фенолфталеина*

Благодаря большому количеству исследований мы имеем ясное представление о механизме карбонизации. И существуют методы прогнозирования процесса карбонизации бетона при различных условиях. Ниже в качестве простейшего технического метода прогнозирования процесса нейтрализации вследствие карбонизации предлагается простая формула. Эмпирическим путем выявлено, что глубина нейтрализации пропорциональна квадратному корню времени воздействия. И задавая  $a$  как коэффициент пропорциональности (коэффициент скорости нейтрализации), мы можем спрогнозировать процесс нейтрализации.

$$X_c = a\sqrt{t}. \quad (3)$$

Здесь  $X_c$  – глубина нейтрализации;  $a$  – коэффициент скорости нейтрализации;  $t$  – время выдержки (воздействия). Коэффициент скорости нейтрализации зависит от исходных материалов, марки бетона, концентрации углекислого газа, температуры окружающей среды, относительной влажности и т. д. Основываясь на данных прошлых исследований, архитектурное научное общество и научное общество гражданского строительства Японии предлагают следующие способы определения коэффициента скорости нейтрализации.

1. Согласно руководству архитектурного научного общества Японии по проектированию прочных и долговечных железобетонных зданий, коэффициент скорости нейтрализации равен<sup>1</sup>:

$$a = k \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_3 \cdot 10, \quad (4)$$

где:

$k$  – коэффициент, равный 1,72 в формуле Киситани и 1,41 в формуле Хакусана;

<sup>1</sup> Архитектурное научное общество Японии. Руководство по проектированию прочных и долговечных железобетонных зданий. Комментарии. 2004.

$\alpha_1$  – коэффициент, зависящий от вида материалов (заполнителей):

- для обычного бетона = 1;
- для лёгкого бетона 1-го типа = 1,2;
- для лёгкого бетона 2-го типа = 1,4;

$\alpha_2$  – коэффициент, зависящий от вида цемента:

- для обычного цемента = 1;
- для быстротвердеющего = 0,85;
- для шлакового цемента А-типа = 1,25;
- для шлакового цемента В-типа = 1,4;
- для шлакового цемента С-типа = 1,8;
- для цемента с летучей золой В-типа = 1,8;

$\alpha_3$  – коэффициент, зависящий от марки цемента (от водоцементного соотношения  $W/C$ );

$\beta_1$  – коэффициент температуры (для Токио = 1, для Саппоро = 0,83, для Сэндай = 0,91, для Осаки = 1,01, для Кагосимы = 1,05);

$\beta_2$  – коэффициент влажности (для Токио = 1, для Саппоро = 0,82, для Сэндай = 0,79, для Осаки = 0,98, для Кагосимы = 0,79);

$\beta_3$  – коэффициент, зависящий от  $CO_2$  (снаружи = 1, внутри помещения = 2).

2. В разделе «Проектирование» стандартной спецификации бетона научного общества гражданского строительства Японии коэффициент скорости нейтрализации равен<sup>1</sup>:

$$\alpha_e = \beta_e \cdot (-3,57 + 9,0 \cdot W/B), \quad (5)$$

где  $W/B$  – эффективное водосвязующее соотношение =  $W/(C_p + k \cdot A_d)$ ;  $W$  – количество воды на единицу объёма;  $B$  – количество эффективного связующего на единицу объёма;  $C_p$  – количество портландцемента на единицу объёма;  $A_d$  – количество добавок на единицу объёма;  $\beta_e$  – коэффициент, выражающий условия окружающей среды (в среде, где бетон быстро высыхает  $\beta_e = 1,6$ ; в среде, где высыхание происходит медленно  $\beta_e = 1$ );  $k$  – коэффициент, выражающий влияние добавок (при использовании летучей золы  $k = 0$ , при использовании мелкого доменного шлака  $k = 0,7$ ).

В общем, чем больше водоцементное соотношение, тем выше коэффициент скорости нейтрализации. Так как чем выше водоцементное соотношение, тем больше количество пустот в бетоне и тем проще становится проникнуть внутрь бетона углекислому газу. Кроме того, высокое водоцементное соотношение означает, что количество цемента относительно небольшое. А если количество цемента невелико, то и количество получаемого в результате реакции гидратации гидроксида кальция невелико, а значит, устойчивость к карбонизации будет низкая

<sup>1</sup> Научное общество гражданского строительства Японии. Стандартная спецификация бетона (Проектирование). 2007.

и щёлочность будет легко нейтрализоваться, то есть скорость нейтрализации будет высокой. Углекислый газ внутри бетона находится в двух сбалансированных состояниях: газообразном и растворённом в поровой жидкости (растворённый углекислый газ). Хотя для реакции карбонизации необходим растворённый углекислый газ, но так как углекислый газ поступает извне, то доминирующим в реакции становится перемещение углекислого газа в газообразном состоянии. По сравнению со скоростью перемещения растворённого углекислого газа, в газообразном состоянии он распространяется намного быстрее. Чтобы газ распространялся внутри бетона, необходимо, чтобы пустоты не были заполнены влагой. Следовательно, карбонизация будет проходить быстрее всего в условиях средней влажности, когда относительная влажность равна 40–60 %. Сама по себе реакция карбонизации, если исключить снижение pH в поровой жидкости, не влечет за собой ухудшения свойств бетона. Часто можно слышать, что «нейтрализация приводит к ухудшению бетона», но во многих случаях это не совсем так. Из-за нейтрализации происходит коррозия арматуры, вследствие чего могут появиться трещины, что несомненно наносит вред бетону. Кроме того, если нейтрализация происходит, например, из-за серной кислоты, о чем пойдёт речь позже, то бетон может даже плавиться. Однако если в бетоне происходит только карбонизация, то это, наоборот, может привести даже к увеличению прочности бетона. Как было упомянуто выше, образованный в результате карбонизации карбонат кальция является устойчивым соединением. И с недавних пор ведутся исследования по иммобилизации углекислого газа, количество которого в атмосфере увеличивается, с помощью реакции карбонизации. Кроме того, разрабатываются новые эффективные материалы, получаемые с помощью карбонизации.

## Щёлочно-силикатная реакция

Щёлочно-силикатная реакция возникает, когда полученные из цемента щёлочи ( $\text{Na}^+$  или  $\text{K}^+$ ) через длительный промежуток времени начинают вступать в реакцию с реакционноспособным кремнезёмом, содержащимся в некоторых видах заполнителей. При этом возникает ненормальное расширение. Как показано на рис. 5.6, вокруг частей заполнителя возникают области с изменённым цветом. Это расширяющиеся гелевые формирования. Отличительной чертой щёлочно-силикатной реакции является образование трещин, по форме напоминающих рисунок на панцире черепахи. Расширяющиеся гелевые формирования поглощают частицы влаги, что приводит к ещё большему расширению. Поэтому при поступлении снаружи дополнительной влаги процесс возникновения трещин может стать очень интенсивным. Известны даже случаи, когда расширение бетона вследствие щёлочно-силикатной реакции приводило к разлому арматуры<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Научное общество гражданского строительства Японии // Библиотека бетона. № 124. Отчёт комитета по контрмерам против реакций щёлочных заполнителей.

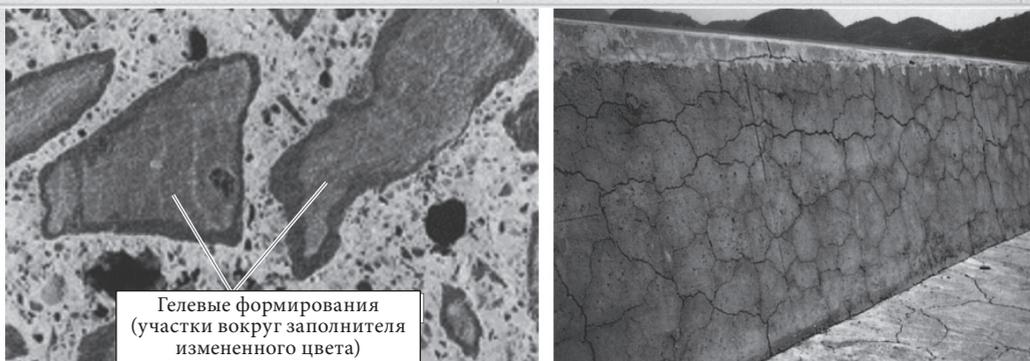


Рис. 5.6. Пример щёлочно-силикатной реакции

Если уменьшить проникновение влаги, то можно до некоторой степени ограничить скорость щёлочно-силикатной реакции. Кроме того, так как образованный в результате реакции щёлочно-силикатный гель при поглощении воды расширяется, то если остановить подачу воды снаружи, можно уменьшить расширение. Уменьшить проникновение влаги можно, например, посредством блокировки трещин смолой или цементом или ещё с помощью покрытия поверхности защитной пленкой или специальной пропиткой. Однако если щёлочно-силикатная реакция однажды произошла, то полностью остановить процесс разрушения бетона довольно трудно. Поэтому, чтобы не допустить возникновения щёлочно-силикатной реакции, нужно ещё на этапе изготовления бетона выбирать материалы с низкой реакционной способностью и при проектировании конструкции предусмотреть, чтобы была возможность подавить реакцию, если возникнет необходимость. Основные моменты, которые нужно учесть:

- не использовать реакционноспособные заполнители;
- ограничить количество щёлочи в бетоне.

Чтобы ограничить количество щёлочи в бетоне, используют, например, низкощелочной портландцемент, также в качестве добавок применяют мелкий доменный шлак или летучую золу, которые потребляют щёлочь в результате реакции.

Итак, если используются такие материалы, нет ли способа оценить, в какой степени на самом деле произойдет ухудшение свойств бетона по причине щёлочно-силикатной реакции? Реакционноспособность заполнителей проверяют химическим методом, установленным в JIS A 1145, или методом испытания образцов из строительного раствора, установленным в JIS A 1146<sup>1</sup>. Кроме того, для оценки реакционноспособности бетона применяют ускоренный тест на износ, который проводят на специально изготовленном образце бетона, и смотрят, возникнет ли щёлочно-силикатная реакция и в какой степени. Но надо принимать

<sup>1</sup> Japan Industrial Standards (JIS) (Японские промышленные стандарты). А – отрасль архитектуры и строительства. – Прим. перев.

во внимание, что бывают случаи, когда реальное состояние конструкции не соответствует результатам, полученным во время лабораторных тестов.

## Заморозка/оттаивание

Если бетон неоднократно испытывает значительные перепады температур, то структура бетона постепенно разрушается. Это явление называется разрушением вследствие заморозки/оттаивания. Вода при переходе из жидкого состояния в твердое (лёд) увеличивается в объёме примерно на 9 %. Поэтому и содержащаяся в твердом цементном теле жидкая вода при замерзании расширяется. Что приводит к повреждениям, например, в виде локальных трещин. Если затем температура поднимется, то замёрзшая внутри твердого цементного тела вода снова растает и вернётся в жидкое состояние, но однажды возникшие повреждения уже не восстановятся. Если же температура снова упадет, вода внутри опять замёрзнет. Таким образом, вода внутри твёрдого цементного тела многократно подвергается то замерзанию, то таянию, что приводит к разрушению микроструктуры бетона.

Процесс заморозки/оттаивания приводит к возникновению шелушения на поверхности бетона (рис. 5.7). Чтобы защитить бетон от негативного воздействия заморозки/оттаивания, эффективно добавлять в бетон специальные воздушные пузырьки. Если отдельные воздушные пузырьки распределить надлежащим образом, то можно ослабить давление расширяющейся при заморозке воды. До того как повышающееся из-за расширения давление нанесёт вред микроструктуре, воздушные пузырьки, подобно подушке, защитят от появления микротрещин. Чтобы добавить воздушные пузырьки в бетон, используют воздухововлекающие добавки (АЕ-добавки, Air Entrained).

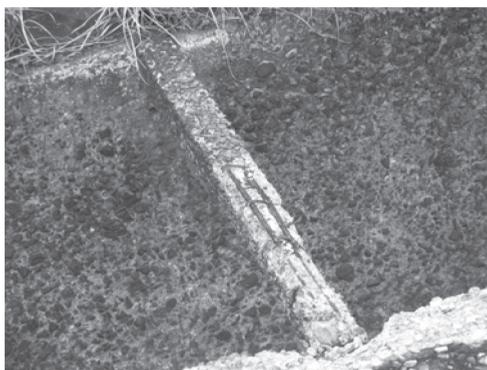


*Рис. 5.7. Шелушение на стене, возникшее из-за заморозки/оттаивания (предоставлено профессором Ава Минору из технологического института Хачинохе)*

Кстати, частицы воды в порах не замерзают даже при температуре немного ниже нуля. Это происходит потому, что влага, находящаяся в крайне мелких пустотах, взаимодействует с твёрдой поверхностью, и возникает термодинамическое явление, называемое **депрессией точки замерзания**. Другими словами, хотя при атмосферном давлении чистая вода в общем случае замерзает при нулевой температуре и превращается в лёд, но частицы воды в порах останутся в жидком состоянии даже при температуре несколько ниже нуля. И чем мельче поры (чем меньше расстояние между стенками пор), тем сильнее взаимодействие между водой и твердой поверхностью и тем ниже будет температура, при которой вода превратится в лёд. Другими словами, если бетон, например, с низким водоцементным соотношением, то он имеет мелкопористую структуру, и даже при охлаждении замерзание воды внутри твёрдого цементного тела будет затруднительным. Поэтому контрмерами против разрушения вследствие заморозки/оттаивания являются понижение водоцементного соотношения и тщательное проведение выдержки, чтобы получить плотную структуру бетона.

## Химическая эрозия

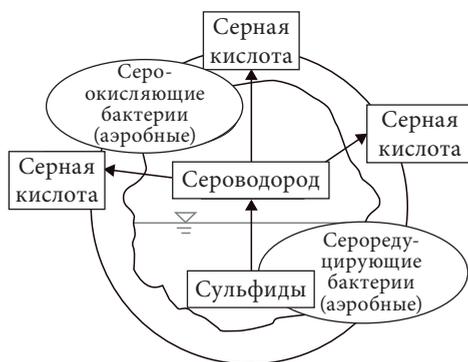
Хотя в бетоне щелочная среда, воздействие природных кислот может стать для него губительным, бетон может плавиться, или в нём могут формироваться расширяющиеся в объёме продукты. Это называется **химической эрозией**. Воздействию кислот бетон подвергается в районе горячих источников, кислотных рек, в кислых или сульфатных почвах, и в таких местах необходимы контрмеры против вредного воздействия кислот. Особенно в Японии, где много горячих источников, остро стоит проблема коррозии бетона из-за воздействия серной кислоты при высоких температурах (рис. 5.8).



*Рис. 5.8. Разрушение бетона в районе горячих источников*

Бывают также случаи коррозии водопроводных труб из-за серной кислоты. Первый случай коррозии канализационной системы из-за серной кислоты был отмечен в 1900 году в Лос-Анджелесе. Тогда сначала решили, что коррозия канализационных труб пошла с поверхности бетона и произошла по причине химической реакции веществ в сточных водах. Но потом выяснили, что причиной коррозии труб стала серная кислота, вырабатываемая бактериями в процессе химического окисления.

В канализационных трубах существуют сероредуцирующие анаэробные бактерии, которые снижают количество серы и вырабатывают сероводород. Этот сероводород растворяется, например, в конденсате на стенках труб и затем вступает в реакцию с аэробными сероокисляющими бактериями, вследствие чего образуется серная кислота (рис. 5.9).

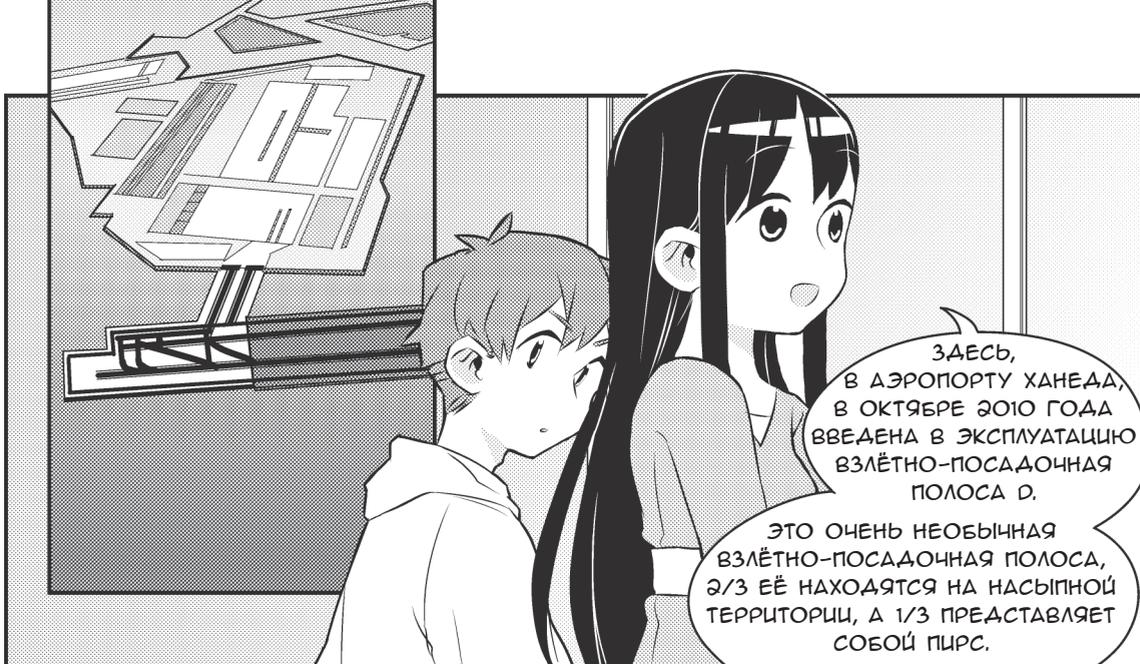


*Рис. 5.9. Выработка серной кислоты бактериями сточных вод*



**ГЛАВА 6**

**РАЗНЫЕ ВИДЫ БЕТОНА**



ЗДЕСЬ,  
В АЭРОПОРТУ ХАНЕДА,  
В ОКТЯБРЕ 2010 ГОДА  
ВВЕДЕНА В ЭКСПЛУАТАЦИЮ  
ВЗЛЁТНО-ПОСАДОЧНАЯ  
ПОЛОСА Д.

ЭТО ОЧЕНЬ НЕОБЫЧНАЯ  
ВЗЛЁТНО-ПОСАДОЧНАЯ ПОЛОСА,  
2/3 ЕЁ НАХОДЯТСЯ НА НАСЫПНОЙ  
ТЕРРИТОРИИ, А 1/3 ПРЕСТАВЛЯЕТ  
СОБОЙ ПИРС.

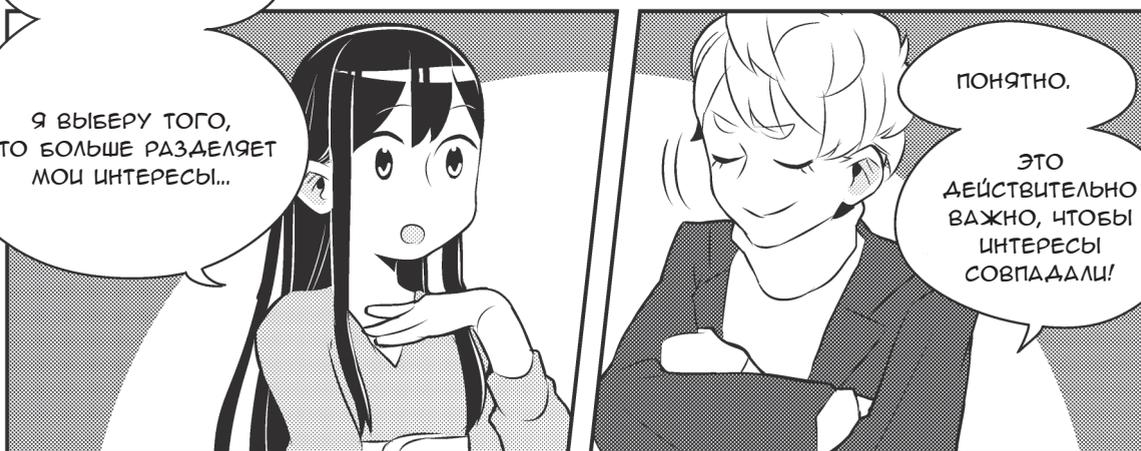
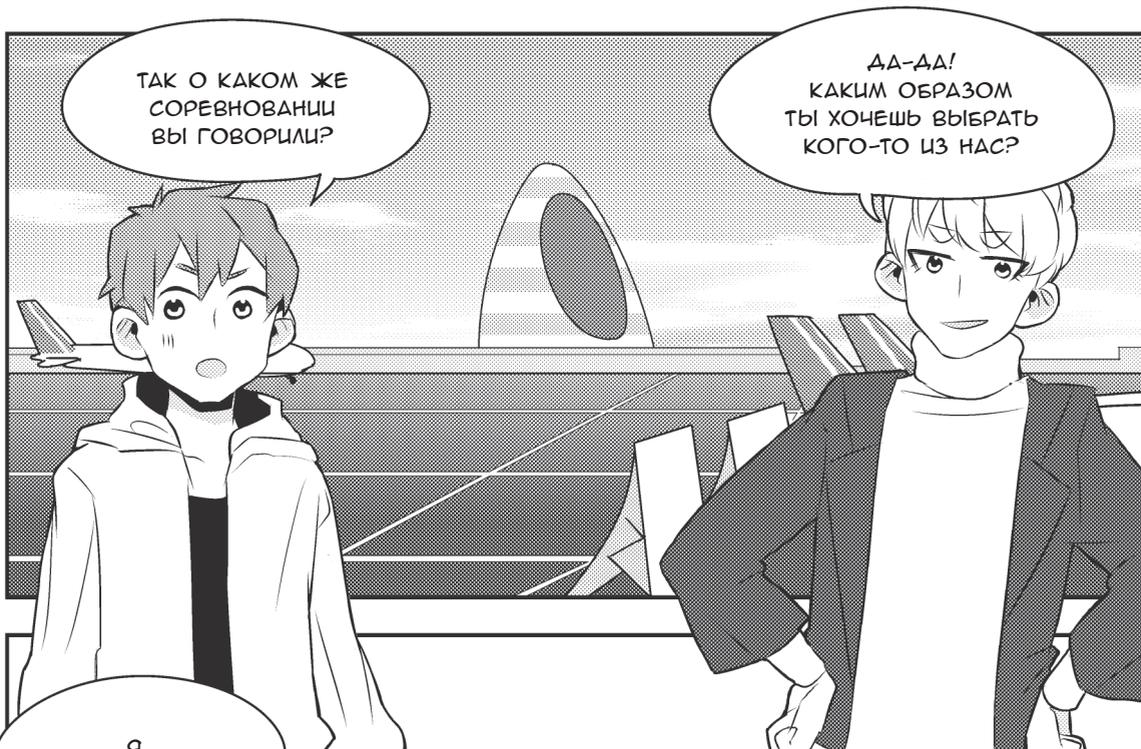


А ЦЕЛКОМ  
ВЗЛЁТНУЮ ПОЛОСУ  
НЕ СДЕЛАЛИ НАСЫПНОЙ,  
ЧТОБЫ НЕ ПРЕРЫВАТЬ  
ТЕЧЕНИЕ ВОДЫ  
И НЕ НАНОСИТЬ ЭТИМ  
ВРЕД ОКРУЖАЮЩЕЙ  
СРЕДЕ, ТАК?



ВЕРНО!

ВЫХОДЯЩИЙ  
В МОРЕ ПИРС СТОИТ  
НА ЖЕЛЕЗНЫХ СВЯЯХ,  
НАКРЫТЫХ СЛОЕМ ЖЕЛЕЗА,  
ПОВЕРХ КОТОРОГО  
ПОСТЕЛЕН БЕТОННЫЙ  
ПОЛ.





РЕШЕНО!

Я ХОЧУ,  
ЧТОБЫ ВЫ СОРЕВНОВАЛИСЬ  
В ЗНАНИЯХ О БЕТОНЕ!

ЧЕГО?!

ХА-ХА...  
ЭТО ТАК ПОХОЖЕ  
НА ВАС, СИБИЛ!



Я ЗАДАМ  
ВСЕГО 7 ВОПРОСОВ.  
ПОБЕДИТ ТОТ, КТО ДАСТ  
БОЛЬШЕ ПРАВИЛЬНЫХ  
ОТВЕТОВ.



ВСЕ ЯСНО!

ЧТО Ж,  
ПРЕКРАСНО!

Я ЖЕ БУДУЩИЙ  
ДИРЕКТОР  
СТРОИТЕЛЬНОЙ  
КОМПАНИИ  
И НЕ ДОЛЖЕН  
ПРОИГРАТЬ  
КАКОМУ-ТО  
СТУДЕНТУ!

Я ЖЕ КАК РАЗ  
ИЗУЧАЮ БЕТОН!



ТОТ КТО ЗНАЕТ ОТВЕТ,  
ПУСТЬ ПОДНИМЕТ РУКУ.

НАЧНЕМ!

Кхе-кхе

## 6.1. ВЫСОКОПРОЧНЫЙ БЕТОН С ХОРОШЕЙ ДЕФОРМИРУЕМОСТЬЮ

ИТАК,  
ПРЕЖДЕ ВСЕГО...

АА!

ЧТО?

Я ЖЕ ЕЩЁ  
НЕ ЗАДАЛА ВОПРОС.

ПРОСТИ!

ХА-ХА-ХА.

.....

В ТАКИХ МЕСТАХ,  
КАК ВЗЛЁТНО-ПОСАДОЧНАЯ  
ПОЛОСА Д, ИСПОЛЗУЮТСЯ ПЛИТЫ  
ИЗ ОБЫЧНОГО СБОРНОГО БЕТОНА.

НО ТУТ ЕСТЬ ОДНА ПРОБЛЕМА.  
РЕЧЬ ИДЕТ ОБ ОЧЕНЬ БОЛЬШИХ  
ПЛОЩАДЯХ ПОВЕРХНОСТИ, В ДАННОМ  
СЛУЧАЕ ПРИМЕРНО 200 ТЫС. М<sup>2</sup>.  
КАКОЙ ЖЕ БЕТОН НУЖНО  
ИСПОЛЗОВАТЬ В ТАКИХ СЛУЧАЯХ?



З-ЗНАЮ!

ЧЕГО?!



ПОЖАЛУЙСТА.



ЭТО СВЕРХПРОЧНЫЙ  
АРМИРОВАННЫЙ ФИБРОЙ  
БЕТОН (СФС)!



СОВЕРШЕННО  
ВЕРНО!

В ОБЫЧНОМ БЕТОНЕ  
ПРИ РАСТЯЖЕНИИ  
ВОЗНИКАЮТ ТРЕЩИНЫ,  
И БЕТОН ЛОМАЕТСЯ.  
ОДНАКО В СЛУЧАЕ  
БЕТОНА СФС, ДАЖЕ  
ЕСЛИ И ВОЗНИКАЮТ  
ТРЕЩИНЫ...

...ФИБРОВОЛОКНО  
ИХ РАССЕИВАЕТ,  
ЧЕМ ПРЕДОТВРАЩАЕТ  
РАЗРУШЕНИЕ БЕТОНА. ТАКАЯ  
ВЫСОКАЯ ДЕФОРМИРУЕМОСТЬ  
И ЯВЛЯЕТСЯ ПРИЧИНОЙ  
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННОГО  
ТИПА БЕТОНА.



КРОМЕ ТОГО,  
ВАЖНА ВЫСОКАЯ ПРОЧНОСТЬ  
БЕТОНА, ЧТОБЫ ЗАЩИТИТЬ ЕГО  
ОТ СОЛЕВОЙ КОРРОЗИИ, ТАК КАК  
КОНСТРУКЦИЯ НАХОДИТСЯ РЯДОМ  
С МОРЕМ. И ЕЩЁ ТАКОЙ ПРОЧНЫЙ  
МАТЕРИАЛ ПОЗВОЛЯЕТ ДЕЛАТЬ ПЛИТЫ ПОЛА  
ДОВОЛЬНО ТОНКИМИ, ЧТО ПРИВОДИТ  
К ОБЩЕМУ СНИЖЕНИЮ ВЕСА.



ВЕРНО!  
И ХОТЯ БЕТОН ЦФС ДОВОЛЬНО  
ДОРОГОЙ, НО В ЦИТОГЕ ОН  
МОЖЕТ ДАЖЕ СНИЗИТЬ ОБЩУЮ  
СТОИМОСТЬ ВСЕЙ КОНСТРУКЦИИ.



ЧЁРТ...

## 6.2. БЕТОН, КОТОРЫЙ МОЖНО ИСПОЛЬЗОВАТЬ В ВОДЕ

ИТАК, ВОПРОС ВТОРОЙ...  
ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ СООРУЖЕНИЙ  
В МОРЕ ИЛИ ОКЕАНЕ, ТАКИХ КАК МОСТ  
НЕБЕСНЫЕ ВОРОТА, СОЕДИНЯЮЩИЙ  
АЭРОПОРТ КАНСАЙ С СУШЕЙ,  
ИЛИ МОСТ АКАСИ-КАЙКЭ...

ЗНАЮ, ЗНАЮ!

НЕ РАССЛАИВАЮЩИЙСЯ  
В ВОДЕ БЕТОН!

А...

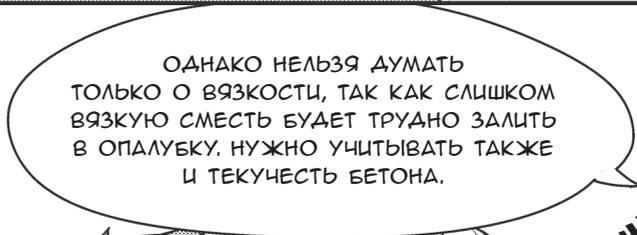
ВЕРНО.

ХЕ-ХЕ!

В ПРОШЛЫЙ РАЗ  
Я ПРОСТО НЕ УСПЕЛ ВОВРЕМЯ  
СОРИЕНТИРОВАТЬСЯ, А ВЕДЬ  
НАША ФИРМА ИМЕЕТ ДЕЛО  
С РАЗНЫМИ ВИДАМИ  
БЕТОНА!

ЕСЛИ ЗАЛИВКА ЦЕМЕНТА  
ПРОИСХОДИТ ПОД ВОДОЙ,  
ТО ИСПОЛЬЗУЕТСЯ НЕ РАССЛАИВАЮЩИЙСЯ  
В ВОДЕ БЕТОН. ЕСЛИ ОБЫЧНУЮ СВЕЖУЮ  
БЕТОННУЮ СМЕСЬ ПОМЕСТИТЬ В ВОДУ,  
ТО ЦЕМЕНТ И ЗАПОЛНИТЕЛИ НАЧНУТ  
РАСТВОРЯТЬСЯ, И ВСЕ РАЗВАЛИТСЯ  
НА ЧАСТИ.

И В ТАКОМ СЛУЧАЕ  
НЕ ТОЛЬКО БУДЕТ  
ТРУДНО ИСПОЛЬЗОВАТЬ  
БЕТОН, НО ТАКЖЕ  
ПРОИЗОЙДЕТ ЗАГРЯЗНЕНИЕ  
ВОДЫ, ЧТО ВРЕДНО  
ДЛЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ,  
ТАК?



### 6.3. БЕТОН ДЛЯ ПРИБРЕЖНЫХ ЗОН

ТРЕТИЙ ВОПРОС.

ЕСЛИ РЕЧЬ ИДЁТ  
О БЕТОНЕ  
В БЕРЕГОВОЙ ЗОНЕ...

Я!

ТАМ СТРОЯТ ДАМБЫ!

НЕТ. ОШИБКА.

ТАК, ГОСПОДИН РАСТ  
ОШИБСЯ, ПОСЛУШАЕМ  
ТЕПЕРЬ, ЧТО СКАЖЕТ  
КЕНАЗИ.

ЧТО?!

ИТАК, ЕЩЕ РАЗ...

В БЕРЕГОВОЙ ЗОНЕ ИЗ БЕТОНА  
СТРОЯТ ДАМБЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ВОДЫ,  
НО КАКОЙ БЕТОН В ТО ЖЕ ВРЕМЯ  
ПОМОГАЕТ СОЗДАТЬ ОТЛИЧНУЮ  
БЕРЕГОВУЮ СРЕДУ?

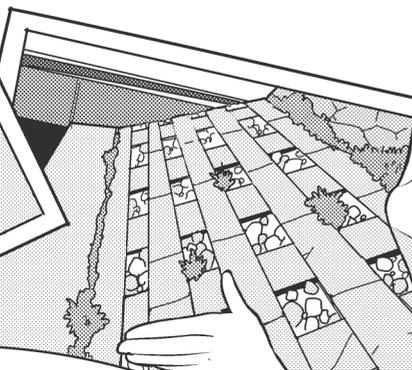
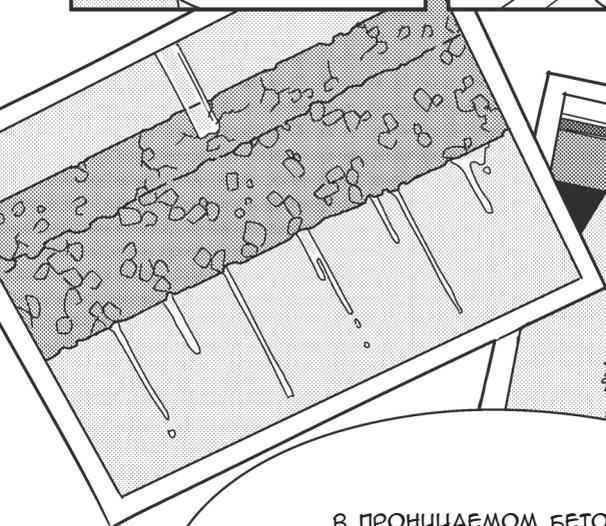


ЭТО...



ПРОНИЦАЕМЫЙ  
БЕТОН?

ДА, ТОЧНО!



В ПРОНИЦАЕМОМ БЕТОНЕ  
МНОГО БОЛЬШИХ ПОР, И В ЭТИХ ПУСТОТАХ  
МОГУТ ПУСКАТЬ КОРНИ РАСТЕНИЯ  
И ЖИТЬ МИКРООРГАНИЗМЫ.



ХМ, ЭТО Я ТОЖЕ  
ПРЕКРАСНО ЗНАЮ...  
ЕСЛИ БЫ ДОСЛУШАЛ  
ВОПРОС ДО КОНЦА...

ЧЁРТ

ЧЁРТ

## 6.4. БЕТОН КАК МАТЕРИАЛ ДЛЯ НАРУЖНЫХ СТЕН

ЧЕТВЕРТЫЙ ВОПРОС.

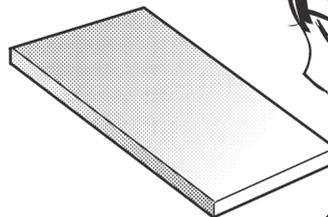
КАКОЙ БЕТОН,  
ТОЖЕ С БОЛЬШИМИ ПОРАМИ,  
КАК И ПРОНИЦАЕМЫЙ БЕТОН,  
ГЛАВНЫМ ОБРАЗОМ ИСПОЛЬЗУЕТСЯ  
ДЛЯ НАРУЖНЫХ СТЕН?



ЗНАЮ!!!

ЭТО ЛЕГКИЙ  
ЯЧЕИСТЫЙ БЕТОН!!!

ВЕРНО...  
ОФИЦИАЛЬНО ЕГО  
ЕЩЕ НАЗЫВАЮТ АЛС.



180 °C

10 атмосфер

ДОБАВЛЕНИЕ  
ПЕНООБРАЗУЮЩЕЙ  
АЛЮМИНИЕВОЙ ПУАРЫ ОБЕСПЕ-  
ЧИВАЕТ ПОЯВЛЕНИЕ БОЛЬШОГО  
КОЛИЧЕСТВА ПУЗЫРЬКОВ. ЗАТЕМ  
ОСУЩЕСТВЛЯЮТ **ВЫДЕРЖКУ**  
**В АВТОКЛАВЕ**, КОГДА БЕТОН  
НА ПРОТЯЖЕНИИ ПРИМЕРНО 10 ЧАСОВ  
НАХОДИТСЯ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИ-  
ЕМ И ПРИ ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ.

БЛАГОДАРЯ БОЛЬШОМУ КОЛИЧЕСТВУ  
ПУЗЫРЬКОВ ВЕС ТАКОГО БЕТОНА  
В 4 РАЗА МЕНЬШЕ ОБЫЧНОГО.  
КРОМЕ ТОГО, ЕГО ТЕПЛОИЗОЛЯЦИ-  
ОННЫЕ СВОЙСТВА РАЗ В 10 ЛУЧШЕ,  
ЧЕМ У ОБЫЧНОГО БЕТОНА.



ТАК ЭТО  
ИЗ-ЗА ХОРОШЕЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ  
ЭТОТ БЕТОН ИСПОЛЬЗУЮТ  
ДЛЯ НАРУЖНЫХ СТЕН, ВЕРНО?





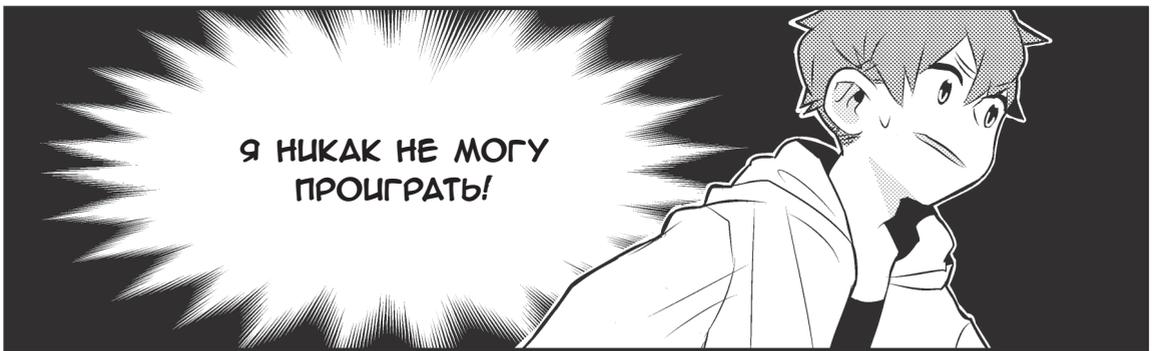


НАШЁЛ ВРЕМЯ  
РАДОВАТЬСЯ!



Я УЖЕ 3 РАЗА  
ПРАВИЛЬНО ОТВЕТИЛ,  
А ТЫ ТОЛЬКО Э!  
ЕСЛИ СЛЕДУЮЩИЙ  
ПРАВИЛЬНЫЙ ОТВЕТ  
ДАМ Я, ТО ИГРА  
ОКОНЧЕНА!

ЭТО Я  
И БЕЗ ВАС  
ПОНИМАЮ!



Я НИКАК НЕ МОГУ  
ПРОИГРАТЬ!

## 6.6. БЕТОН, ИСПОЛЬЗУЕМЫЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ЛУНЫ



ОСТАЛОСЬ 2 ВОПРОСА...

СЕЙЧАС  
МЫ ПЕРЕНЕСЕМСЯ  
В КОСМОС.

В КОСМОС?!





С ПОМОЩЬЮ ЭНЕРГИИ СОЛНЦА  
МОЖНО ОБЖИГАТЬ СОДЕРЖАЩИЕСЯ  
В ЛУННОЙ ПОЧВЕ БАЗАЛТ И АНОРТИТ  
И ТАКИМ ОБРАЗОМ ИЗГОТАВЛИВАТЬ  
ЦЕМЕНТ!

ВЕРНО!

ОТЛИЧНО!

БЛИЦ!

УРА!  
СЧЁТ  
СРАВНЯЛСЯ!

ПОДОЖДИТЕ-КА!  
НО ВЕДЬ НА ЛУНЕ  
НЕТ ВОДЫ!

А ЗНАЧИТ, И БЕТОН  
НЕЛЬЗЯ СДЕЛАТЬ?!

ХМ...





ПРЕДПОЛАГАЕТСЯ ДОСТАВЛЯТЬ  
С ЗЕМЛИ ВОДОРОД И ДЕЛАТЬ  
ВОДУ, ДОБЫВАЯ КИСЛОРОД  
ИЗ ЛУННЫХ ГОРНЫХ ПОРОД!





ЭТО СОРЕВНОВАНИЕ  
ВСЁ РАВНО НЕ ИМЕЕТ  
НИКАКОГО СМЫСЛА!

ОХ!

ХВАТИТЬ ЗАНИМАТЬСЯ  
ЕРУНДОЙ, СЫН,   
МЫ УХОДИМ!!

**ХВАТЬ**



Эй!!!



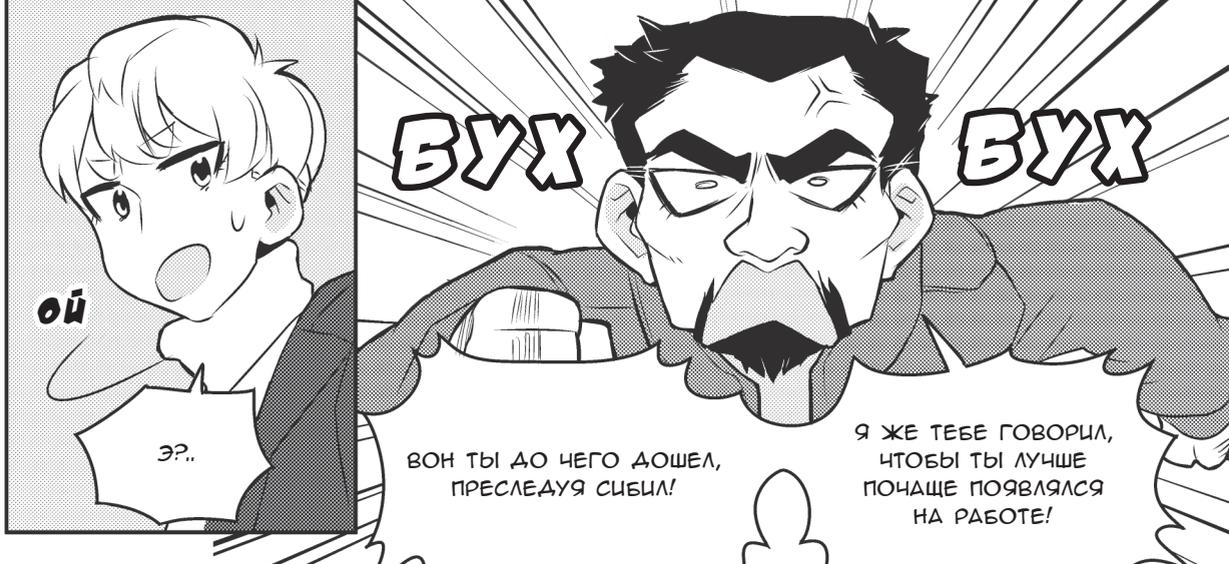
**НЕТ!**



МММ...



Эй, РАСТ!



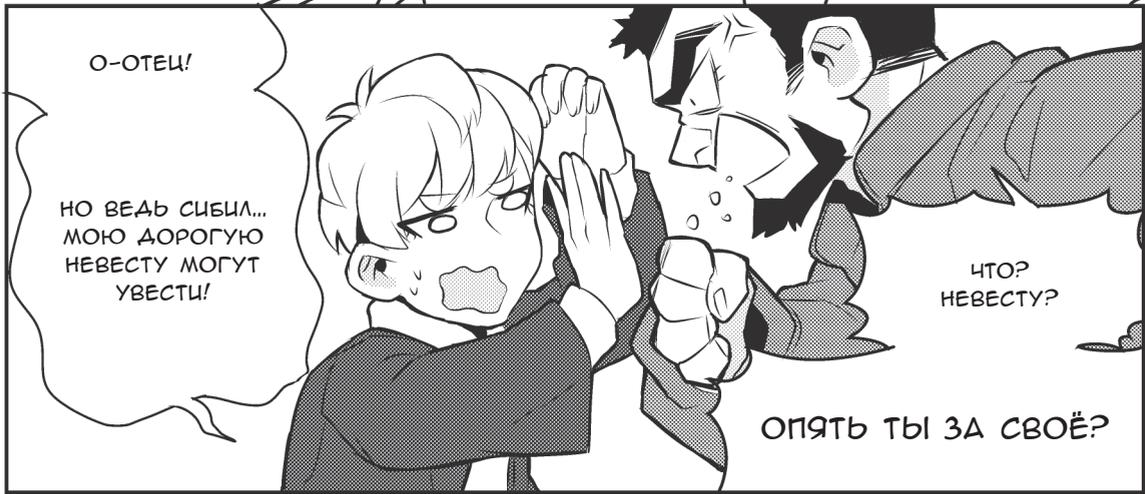
эй

Э?..

**БУХ БУХ**

ВОН ТЫ ДО ЧЕГО ДОШЕЛ,  
ПРЕСЛЕДУЯ СЕБЯ!

Я ЖЕ ТЕБЕ ГОВОРИЛ,  
ЧТОБЫ ТЫ ЛУЧШЕ  
ПОЧАЩЕ ПОЯВЛЯСЯ  
НА РАБОТЕ!



О-ОТЕЦ!

НО ВЕДЬ СЕБЯ...  
МОЮ ДОРОГУЮ  
НЕВЕСТУ МОГУТ  
УВЕСТИ!

ЧТО?  
НЕВЕСТУ?

ОПЯТЬ ТЫ ЗА СВОЁ?



А?..



**КРУТЬ**





КАЖЕТСЯ,  
ПРОБЛЕМА  
РЕШЕНА?..



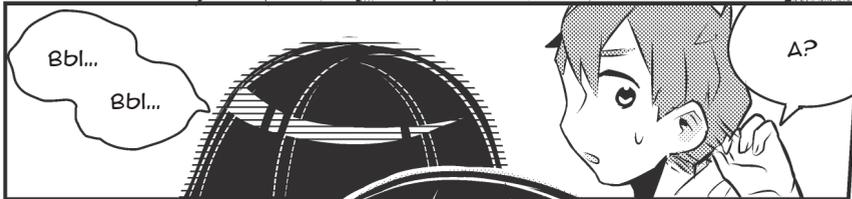
АГА.

ПОХОЖЕ  
НА ТО...



НО...

ПОДХОЖУ ЛИ Я ВАМ,  
СИБИЛ?



ВЫ...

ВЫ...

А?



А?!



ВЫ МНЕ  
ПРАВИТЕСЬ...



ОЧЕНЬ!

П-ПРАВДАА?!



ДА!  
НА САМОМ ДЕЛЕ  
НИКАКОЕ СОРЕВ-  
НОВАНИЕ МНЕ  
НЕ БЫЛО НУЖНО.

ПРОСТО  
Я НЕ ЗНАЛА, КАК  
ПО-ДРУГОМУ  
СДЕЛАТЬ ТАК,  
ЧТОБЫ РАСТ  
ЭТО ПОНЯЛ...



ВОТ ОНО ЧТО...



В-ВЫ МНЕ ТОЖЕ  
ОЧЕНЬ ПРАВЯТЕСЬ, СИБИЛ!  
С САМОГО НАЧАЛА!

Я ТАК РАДА ♥

## ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

### Разные виды бетона

В этой книге мы детально рассмотрели основные вопросы, касающиеся бетона. Множество социально значимых объектов и архитектурных сооружений было построено с использованием разных видов бетона, которые, в свою очередь, появляются в результате выбора исходных материалов, расчёта их пропорций, проектирования конструкций и проведения строительных работ. Если рассматривать бетон древних времён, то история бетона как строительного материала насчитывает несколько тысяч лет. Но в последнее время особенно появляется всё больше различных технологических разработок в области бетона.

Далее я хочу привести несколько примеров бетона, обладающих новыми возможностями.

### Сверхпрочный бетон, армированный фиброй бетон

Как было рассказано в главе 1, прочность на сжатие у широко используемого обычного бетона в основном попадает в диапазон 20–40 Н/мм<sup>2</sup>. Но не так давно был разработан сверхпрочный бетон, прочность на сжатие у которого равна 200 Н/мм<sup>2</sup>, что примерно в 10 раз больше, чем у обычного бетона<sup>1</sup>. Чтобы получить бетон такой высокой прочности, наряду с чрезвычайно низким водоцементным соотношением (меньше 20 %) используют сверхмелкие частицы с диаметром 0,1 мкм, называемые **микрокремнезёмом**. Размер частиц цемента в среднем равен 10–20 мкм, что в 50–100 раз больше, чем у частиц микрокремнезёма. Такие сверхмелкие частицы, размещаясь в пустотах между цементом и заполнителем и в пустотах, образующихся при гидратации, эффективно заполняют микропоры в затвердевающем цементе, благодаря чему обеспечивают чрезвычайно высокую прочность. Кроме того, основным ингредиентом микрокремнезёма является диоксид кремния, который так же, как летучая зола, обладает пуццолоановой активностью, то есть сам по себе тоже увеличивает прочность бетона.

Один из примеров использования сверхпрочного бетона – колонны небоскрёбов. Так как вес небоскрёбов очень большой, то и сила, давящая на колонны нижних этажей, очень велика. Чтобы выдержать такую силу, можно увеличить размер колонн, но в этом случае придётся пожертвовать полезной площадью. В таких случаях в многоэтажных офисных зданиях или в жилых домах для колонн первого этажа используют сверхпрочный бетон, который выдерживает нагрузку от собственного веса здания без увеличения площади колонн.

---

<sup>1</sup> Мицуи Кенро, Кодзима Масаро и др. Разработка норматива прочности высокопрочного бетона от 150 до 200 Н/мм<sup>2</sup> и его применение на практике // Технический отчёт Архитектурного общества Японии. 2010. Фев. № 16/32. С. 21–26.

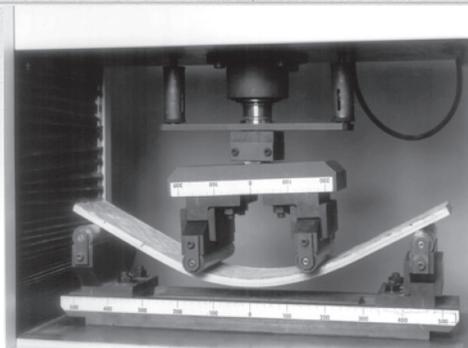
Кстати говоря, чем выше этаж, тем меньше нагрузка на колонны и тем менее прочный бетон можно использовать. В гражданском строительстве сверхпрочный бетон также иногда используют для мостовых балок (рис. 6.1). Это позволяет делать балки меньше и тоньше, в то же время увеличивая пролеты моста и тем самым сокращая количество опор. Сверхпрочный бетон позволяет сооружать мосты, которые ранее не были возможны, и тем самым расширяет возможности архитекторов.



*Рис. 6.1. Пример пешеходного моста, построенного с использованием сверхпрочного бетона (фото предоставлено строительной корпорацией Кадзима)*

Бетон – это материал, довольно прочный на сжатие, но плохо выдерживающий растяжение. Чтобы преодолеть этот недостаток бетона, также постоянно ведутся разработки новых материалов. Например, были разработаны высокопрочные цементные композиты<sup>1</sup>. Обычный бетон, как правило, демонстрирует хрупкость при воздействии растяжения. По причине растяжения возникают трещины, из-за которых сопротивляемость воздействию растяжения падает ещё больше, что приводит к разрушению бетона в дальнейшем. Высокопрочные цементные композиты не используют крупные заполнители вроде гравия, а состоят из цемента, воды и песка. В строительный раствор добавляются волокна, и даже после появления трещин из-за растяжения прочность не уменьшается. Так получается материал, обладающий свойством деформационного упрочнения. В качестве волокон используются органические волокна полиэтилена или винилона, а также стальные волокна диаметром в несколько десятков микрон. В общем объёме бетона волокна занимают 1–2 %. При воздействии силы такой материал распределяет большое количество мелких трещин, чем демонстрирует высокую деформируемость (рис. 6.2).

<sup>1</sup> Научное общество гражданского строительства Японии // Библиотека бетона. № 127.



*Рис. 6.2. Отличная деформируемость вследствие применения высокопрочных цементных композитов (фото предоставлено строительной корпорацией Кадзима)*

## Проницаемый бетон

Чтобы защититься от цунами и наводнений, на берегах морей и рек строят различные сооружения вроде дамб или волнорезов. Эти бетонные сооружения выполняют очень важную роль щита, защищающего от природных катастроф жизни людей и их имущество. Но, с другой стороны, фраза «укрепить берег бетоном» ассоциируется с чем-то холодным и искусственным, что, вероятно, только испортит природу. И в самом деле, например, когда бетон покрывает дно реки и распространяется по обоим берегам, это очень эффективно с точки зрения контроля уровня воды, но в то же время оказывает негативное влияние на естественную среду обитания животных и растений. И в последнее время ведутся разработки, нацеленные на создание бетона, который, выполняя функции сдерживания воды, не будет наносить вреда окружающей среде. Так был создан проницаемый бетон, внутри которого имеется множество больших пустот (пор). Если поверхность обычного бетона гладкая и ровная, то поверхность проницаемого бетона шероховатая. В больших пустотах проницаемого бетона могут селиться различные микроорганизмы и насекомые. Кроме того, с поверхности бетона во внутренние пустоты легко проникают частицы земли, что позволяет прорасти на поверхности бетона различным растениям. Таким образом данный бетон может восстанавливать экосистему побережья и создавать обильную окружающую среду (рис. 6.3).



*Рис. 6.3. Растительность, появившаяся благодаря использованию проницаемого бетона (фото предоставлено строительной корпорацией Кадзима)*

В последние годы из-за изменения климата и влияния урбанизации возросло количество проливных дождей. Из-за низкой проницаемости обычных дорожных покрытий, таких как асфальт или бетон, воде трудно проникнуть в грунт под поверхностью дороги. В результате большое количество воды течет по поверхности, что увеличивает риск затопления. Если же вместо обычных дорожных покрытий использовать проницаемый бетон, то дождевая вода будет легко проникать в грунт, что снизит риск затопления и, кроме того, обогатит грунтовые воды. Более того, внутри проницаемого бетона остается множество частиц воды, которые начинают испаряться при повышении температуры окружающей среды, тем самым снижая вероятность перегрева. Механизм этого явления подобен разбрызгиванию воды в садах и на улицах с целью охлаждения, как это было принято в древней Японии. Ожидается, что использование проницаемого бетона смягчит летнюю жару в городах, так как сохраняемая после дождей в порах бетона влага уменьшает температуру, испаряясь во время жары.

### **Самовосстанавливающийся бетон**

В случае недомогания или при появлении небольших ран наши тела могут самостоятельно восстанавливаться благодаря врожденной способности к регенерации. Например, когда при получении небольшой раны на поврежденной коже возникает корочка, останавливающая кровь, и нейтрализуются проникшие извне патогенные организмы – это действует иммунная система, которая обусловлена естественной способностью живых организмов к восстановлению. Если бы и бетон, подобно живым организмам, мог восстанавливать свои раны (трещины), возникающие из-за перепадов температур или при изменении объема конструкции, например из-за сжатия, то срок эксплуатации бетонных

конструкций значительно увеличился бы, а обслуживание конструкций стало бы значительно проще.

Но кажется, что самостоятельно заделывающий трещины бетон может быть только в сказке, не так ли? Однако если речь идёт о крошечных трещинах, то находящийся внутри бетона ещё не гидратированный цемент, взаимодействуя с поступающей извне водой, может естественным образом закрывать такие трещины. И это явление известно с древних времен. Это свойство бетона и называют **самовосстановлением**. А во второй половине 1990-х гг. также начались активные разработки в области создания так называемых «умных» новых материалов, которые могли бы самостоятельно восстанавливать возникающие трещины, не восстанавливаемые естественным образом<sup>1</sup>. В настоящее время создается несколько видов самовосстанавливающегося бетона, в основе которых лежат различные принципы и механизмы. Один из этих видов разрабатывается под руководством профессора Киси Тосихару в Институте производственных технологий Токийского университета<sup>2</sup>. В этом бетоне при попадании в появившуюся трещину воды извне содержащиеся в бетоне расширяющиеся добавки активизируются и закрывают собой трещины. Было выявлено, что для появившейся после затвердевания бетона трещины размером 0,2 мм восстановление занимает 3 дня, после чего трещина основательно блокируется. Ожидается, что особенно эффективно использование этого бетона будет для конструкций, для которых существует опасность протекания из-за трещин. Существует ещё такой принцип: в бетон встраивается датчик, который при обнаружении трещины выделяет тепло, при этом из-за повышения температуры плавится встроенная в бетон трубка с ремонтным материалом, который и заделывает трещину<sup>3</sup>. Кроме того, придумали способ, когда в бетон заранее помещаются способные жить в сильно щелочной среде бактерии. Идея в том, что при образовании трещины бактерии активизируются, и из-за их дыхания выделяется углекислый газ, являющийся причиной выработки карбоната кальция, который, в свою очередь, закрывает трещины<sup>4</sup>.

## Лунный бетон

Для того чтобы проводить исследования космоса и освоить ресурсы Луны, во многих странах изучают разные возможности по созданию базы на лунной по-

---

<sup>1</sup> Киси Тосихару. Разработка технологии самовосстановления трещин для создания бетона с высоким потенциалом // Бетонная техника. 2011. № 49 (5). С. 74–77.

<sup>2</sup> Tae-Ho Ahn and Toshiharu Kishi. Crack Self-healing Behavior of Cementitious Composites Incorporating Various Mineral Admixtures // Journal of Advanced Concrete Technology. 2010. № 8 (2). С. 171–186.

<sup>3</sup> Nishiwaki T., Mihashi H., Jang B. K. and Miura K. Development of Self-Healing System for Concrete with Selective Heating around Crack // Journal of Advanced Concrete Technology. 2006. № 4(2). С. 267–275.

<sup>4</sup> Ramachandran S. K., Ramakrishnan V. and Bang S. S. Remediation of Concrete Using Micro-Organisms // ACI Material Journal. 2001. № 98 (1). С. 3–9.

верхности. Для этих целей очень важно использовать, насколько это возможно, локальные ресурсы. Так как вдобавок к тому, что доставка ресурсов с Земли очень дорогостоящая, целью исследования космоса является также использование внеземных ресурсов. Поэтому особое внимание уделяется бетону как возможному строительному материалу.

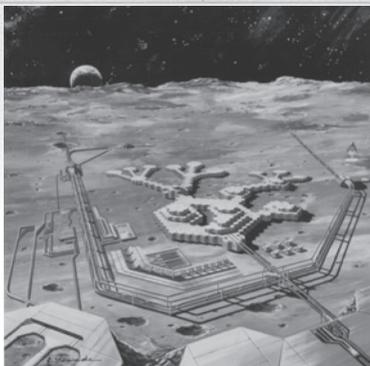
В рамках программы «Аполлон» космического агентства США НАСА впервые в истории человек высадился на Луну. В то же время с Луны были доставлены экземпляры горных пород. Из анализа НАСА следует, что в лунных горных породах содержатся такие минералы, как анортит, оливин, пироксен и ильменит. Поверхность Луны покрыта песчаным слоем, который называется реголит, полученным в результате столкновений с метеоритами. И в этом реголите содержится в большом количестве анортит, являющийся материалом для цемента. При обжиге анортита с помощью солнечной энергии можно получить цементный продукт, похожий на компоненты портландцемента и глинозёмистого цемента<sup>1</sup>. Основной компонент глинозёмистого цемента – алюминат кальция. Данный цемент относится к быстротвердеющим. Если же в качестве заполнителя использовать лунный песок, то производство бетона может быть довольно простым.

Следовательно, остаётся только один недостающий необходимый элемент для производства бетона – вода. К сожалению, на Луне нет воды, и водорода, чтобы создать воду, тоже почти нет. Поэтому есть идея доставлять с Земли только водород, который, вступая в реакцию с кислородом, содержащимся в лунном грунте, будет создавать воду. Если говорить подробнее, то для этого планируется использовать содержащийся в большом количестве на поверхности Луны ильменит. Химическая формула ильменита –  $\text{FeTiO}_3$ , то есть он состоит из железа и оксида титана. И наиболее рациональным считается способ получения воды путём восстановления кислорода, содержащегося в ильмените, водородом, доставленным с Земли<sup>2</sup>. Предполагается построить на поверхности Луны базу, состоящую из объединённых бетонных модулей шестиугольной формы, которые будут сделаны из бетона, произведённого описанным выше способом (рис. 6.4).

---

<sup>1</sup> *Mishulovich A., Lin T. D. and Tresouthick S. W. Lunar Cement Formulation // ACI, SP-125. С. 255–264. 1991.*

<sup>2</sup> *Kanamori H., et al. A Cost Study of Concrete Production on the Moon, Space 90 // Engineering, Construction, and Operations in Space, ASCE, Albuquerque. Aug. 1990.*



*Рис. 6.4. Проект базы на Луне, построенной из лунного бетона (фото предоставлено строительной корпорацией Симидзу)*

### **Уроки прошлого. Самый прочный бетон доктора Ёсида Токудзиро**

Как уже упоминалось выше, благодаря значительному прогрессу технологий недавно был разработан сверхпрочный бетон, прочность на сжатие которого превышает  $200 \text{ Н/мм}^2$ . При упоминании об этом может создаться впечатление, что только в последнее время наконец-то был получен бетон высокой прочности. Однако на самом деле более чем 70 лет назад уже был создан профессором Ёсида Токудзиро<sup>1</sup> из Токийского императорского университета бетон с прочностью на сжатие более  $100 \text{ Н/мм}^2$ . Хотя данный уровень прочности бетона не достигает уровня XXI века, но в то время, когда ещё не использовались высокоэффективные водоредуцирующие добавки, удивительно, как с помощью обычных материалов достигался такой высокий уровень прочности бетона.

В то время обычная прочность на сжатие для бетона через 28 дней выдержки равнялась  $10\text{--}30 \text{ Н/мм}^2$ , а высокопрочным считался бетон с прочностью на сжатие  $30\text{--}40 \text{ Н/мм}^2$ . В то же время при использовании обычного портландцемента прочность цементной пасты через 28 дней достигала  $100\text{--}120 \text{ Н/мм}^2$ , и посчитав, что такая прочность на сжатие для бетона максимально возможная, профессор Ёсида Токудзиро назвал такой бетон «самым прочным бетоном»<sup>2</sup>. После проведения очень большого количества тщательных экспериментов с разными видами портландцемента и заполнителей, пропорциями ингредиентов, водоцементным соотношением, заливкой и выдержкой бетона был выбран наиболее простой способ получения бетона высокой прочности.

<sup>1</sup> Ёсида Токудзиро. Производство самого прочного бетона // Журнал научного общества гражданского строительства Японии. 1940. № 11. С. 997–1006.

<sup>2</sup> Там же.

Изменение прочности самого прочного бетона показано на рис. 6.5. В настоящее время используется единица измерения  $\text{Н/мм}^2$  по системе СИ, а в то время использовались  $\text{кгс/см}^2$  по системе МКГСС, поэтому и на представленном графике используются единицы измерения по системе МКГСС.  $1 \text{ кгс} = 9,8 \text{ Н}$ , поэтому, округляя, можно считать, что  $1000 \text{ кгс/см}^2 = 100 \text{ Н/мм}^2$ . В бетоне с самой высокой прочностью на сжатие водоцементное соотношение равно 22,0–22,8 %, а цемент, мелкие и крупные заполнители находятся в пропорции 1:1:2. На рис. 6.5 представлены усреднённые результаты испытаний на сжатие трёх образцов по прошествии трёх дней значение прочности на сжатие превысило  $1000 \text{ кгс/см}^2$ , а через год достигло почти  $1200 \text{ кгс/см}^2$ . Даже на наш современный взгляд это очень высокие показатели прочности на сжатие. И ещё привлекает внимание один момент: как же в эпоху, когда ещё не существовало высокоэффективных водоредуцирующих добавок, удалось создать бетон с таким низким водоцементным соотношением.

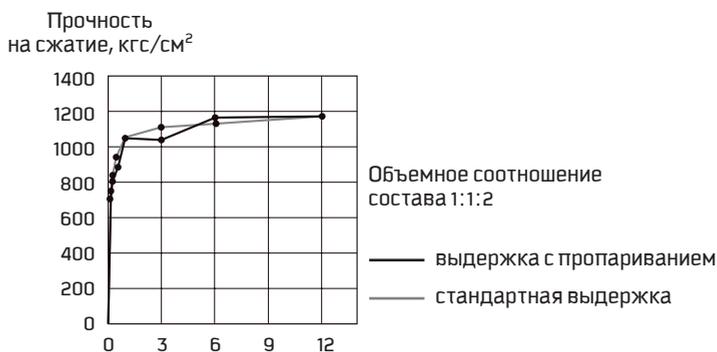


Рис. 6.5. Изменение прочности самого прочного бетона<sup>1</sup>

Производство бетона осуществлялось следующим образом. Сначала производилось уплотнение трамбовкой, затем действовали вибратором, после чего с двух сторон опалубки по 8 минут оказывали давление в  $100 \text{ кгс/см}^2$ . При давлении выделялась влага, которая находилась в пустотах, и эту влагу тщательно вытирали тканью, после чего определяли количество выделенной воды посредством взвешивания ткани. Другими словами идея была в том, чтобы после добавления воды для обеспечения обрабатываемости бетона и затем его заливки в опалубку с помощью давления удалить излишки влаги. Так, без использования высокоэффективных водоредуцирующих добавок из бетона удаляли влагу и получали низкое водоцементное соотношение. Было отмечено, что на изго-

<sup>1</sup> Ёсида Токудзиро. Производство самого прочного бетона // Журнал научного общества гражданского строительства Японии. 1940. № 11. С. 997–1006.

товление одного образца требовалось около 1 часа 50 минут. Так что потребовалось много усилий, чтобы получить бетон с низким водоцементным соотношением.

Кстати, позднее доктор Окамура Хадзиме, руководивший разработкой самоуплотняющегося бетона, был потрясен, заметив, что пропорции составляющих у самого прочного бетона и самоуплотняющегося бетона крайне похожи<sup>1</sup>. Навероятно, но факт: если к указанному в работе доктора Ёсида составу бетона добавить высокоэффективную водоредуцирующую добавку, то получится самоуплотняющийся бетон. На рис. 6.6 по горизонтали отложены соотношения объёмов заполнителей, а по вертикали плотность на сжатие. Белые кружки  $\circ$  на графике означают соотношение объёмов мелких заполнителей к цементу, равное 1,5, а черные  $\bullet$  означают соотношение тех же показателей, но равное 1. Проводя эксперимент, понемногу добавляли крупные заполнители и смотрели, как это отразится на прочности на сжатие. Из графика видно, что при увеличении количества крупных заполнителей, когда соотношение объёмов заполнителей превысит значение 0,6, прочность на сжатие бетона начинает резко снижаться. Это происходит потому, что при увеличении количества заполнителей они начинают контактировать друг с другом, и тогда давление извне не передаётся пастообразным составляющим, а содержащаяся в пасте влага не выходит наружу. Так как для качества бетона после затвердевания нужно как можно большее количество заполнителя, то оптимальным соотношением, обеспечивающим высокую прочность, будет являться значение, находящееся перед резким падением прочности на сжатие, то есть соотношение объёмов заполнителей немного меньшее, чем 0,6.

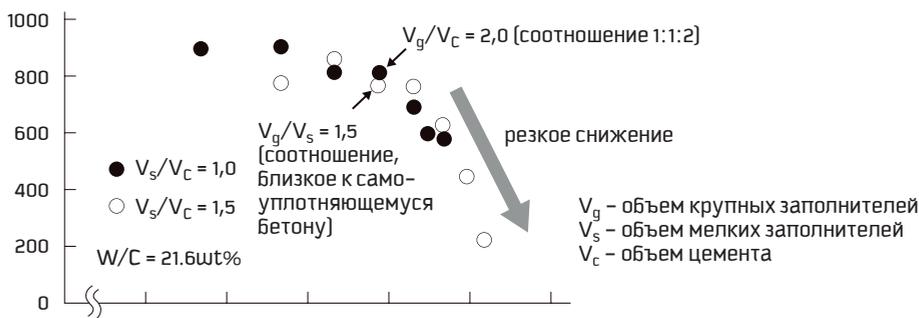


Рис. 6.6. Изменение прочности на сжатие в зависимости от соотношения заполнителей в составе бетона

<sup>1</sup> Окамура Хадзиме, Кадзумаса Одзава. Актуальные вопросы проектирования самоуплотняющегося бетона // Научное общество гражданского строительства Японии: сб. эссе. 1994. № 496/V-24. С. 1–8.

Как видно из графика, оптимальная пропорция для самоуплотняющегося бетона тоже будет соответствовать значению, немного меньшему, чем то, после которого начинается резкое падение прочности. На самом деле это логично, что состав самоуплотняющегося бетона и самого прочного бетона совпадают. В случае самоуплотняющегося бетона необходимо такое количество заполнителей, чтобы при подаче свежей бетонной смеси элементы заполнителя не соединялись и не вступали в реакцию друг с другом. И хотя воздействие сил несколько отличается (в самом прочном бетоне – сила тела, а в самоуплотняющемся – сила сдвига), с точки зрения взаимодействия сил между заполнителями и пастой оптимальное соотношение будет определяться по одному и тому же механизму. Похоже, здесь мы имеем пример вневременной универсальности бетонных технологий.

Разработка самого прочного бетона в то время велась для производства бетонных сегментов, используемых при строительстве туннеля Каммон для японских железных дорог. Планировалось строить туннель с помощью проходческого щита, но прогнозировалась нехватка железа. И чтобы заменить чугунные сегменты на бетонные и начались исследования на тему производства самого прочного бетона. Исследования доктора Ёсида оказались настолько успешными, что строительство туннеля было завершено в 1942 году. Расчётная прочность на сжатие железобетонного сегмента равнялась  $600 \text{ кгс/см}^2$ . Бетон для каждого сегмента заливался в 5 этапов и тщательно обрабатывался на протяжении двух с половиной часов. И реальная прочность на сжатие бетона через год составила  $1080 \text{ кгс/см}^2$ <sup>1</sup>. После чего он использовался повсеместно по стране для сегментов метро и для производства железобетонных плит, и на протяжении более чем 30 лет данный бетон оставался самым прочным в мире<sup>2</sup>.

В работе доктора Ёсида перечислены следующие условия, необходимые для производства самого прочного бетона:

- хороший цемент с высокой прочностью;
- заполнители должны быть чистые и твёрдые, обладающие большей прочностью, чем цементная масса в бетоне, формой округлые или кубические, с шероховатой поверхностью, высокой адгезией с цементной массой, с небольшим количеством пустот и должны обеспечивать необходимую обрабатываемость;
- увеличенное количество цемента в составе в рамках необходимости;
- уменьшить, насколько возможно, количество воды, но в рамках необходимого для производства бетона количества;

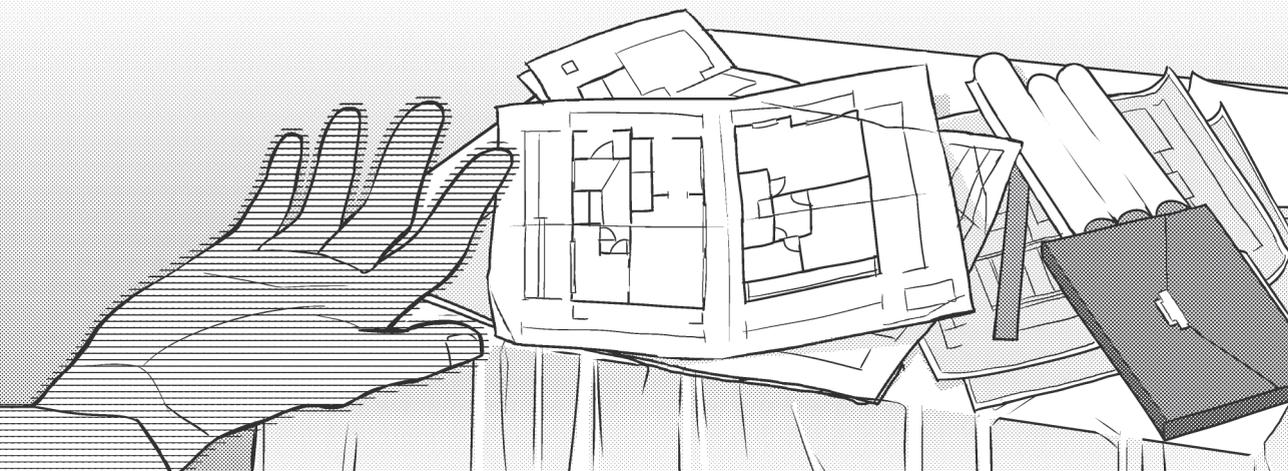
<sup>1</sup> Асакура Тосихиро, Кураку Хироси и др. Железнодорожный туннель Канмон: особенности // Бетонная техника. 1994. № 496. V-24. С. 1–8.

<sup>2</sup> Кокубу Масатане. Как повлияла на мир работа доктора Ёсида Токудзиро «Производство самого прочного бетона». В память о работе доктора Ёсида Токудзиро. 1993.

- так как бетон получается плотным с малым количеством воды, необходимо тщательно провести уплотнение;
- тщательная выдержка.

Изготовленный при соблюдении вышеперечисленных условий бетон имеет очень высокую прочность, но если нужно получить высокопрочный бетон на более ранних стадиях, используют выдержку при высоких температурах, что ускоряет химические реакции.

Принимая во внимание вышеперечисленные условия, можно получить бетон не только высокопрочный, но также долговечный и очень качественный. Так что правила доктора Ёсида и в настоящее время являются актуальными и универсальными.



ЧТО ДУМАЕШЬ?



КАКОЙ-ЖЕ ТЫ ВСЁ-ТАКИ  
ПРЕКРАСНЫЙ АРХИТЕКТОР,  
КЕНАЗИ!!



СПАСИБО!!



НАКОНЕЦ-ТО У НАС БУДЕТ...



...НАШ СОБСТВЕННЫЙ ДОМ!

Книги издательства «ДМК Пресс» можно заказать в торгово-издательском холдинге «Планета Альянс» наложенным платежом, выслав открытку или письмо по почтовому адресу:

115487, г. Москва, 2-й Нагатинский пр-д, д. 6А.

При оформлении заказа следует указать адрес (полностью), по которому должны быть высланы книги; фамилию, имя и отчество получателя.

Желательно также указать свой телефон и электронный адрес.

Эти книги вы можете заказать и в интернет-магазине: [www.a-planet.ru](http://www.a-planet.ru).

Оптовые закупки: тел. (499) 782-38-89.

Электронный адрес: [books@aliants-kniga.ru](mailto:books@aliants-kniga.ru).



Тэцую Исида (автор), Харую (художник)

## **Занимательное строительство**

### **Бетон**

### **Манга**

Главный редактор *Д. А. Мовчан*  
[dmkpress@gmail.com](mailto:dmkpress@gmail.com)

Научный редактор *О. Н. Шевелёва*

Переводчик *С. Л. Плеханова*

Корректор *Г. И. Синяева*

Верстальщик *А. А. Чаннова*

Формат 70×100 1/16.

Гарнитура Anime Ace. Печать офсетная.

Усл. п. л. 17,06. Тираж 500 экз.

Веб-сайт издательства [www.dmkpress.com](http://www.dmkpress.com)