

В. Дуда

Цемент

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 528
ББК 38.2
В11

В11 **В. Дуда**
Цемент / В. Дуда – М.: Книга по Требованию, 2021. – 463 с.

ISBN 978-5-458-33924-7

ISBN 978-5-458-33924-7

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2021

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2021

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



Серия Книжный Ренессанс

www.samizday.ru/reprint

Предисловие ко второму изданию

Первое издание этой книги было распродано за несколько месяцев после выхода из печати. Специалисты всего мира высказали пожелания о дополнении и расширении справочного материала. Поэтому при втором издании книга подверглась значительной переработке, в результате чего выпущено капитальное издание по технологии мировой цементной промышленности.

Автор и издательство.

Предисловие автора

При работе над книгой по производству цемента преследовалась цель дать в наиболее сжатой форме всестороннее представление о способах производства, машинах и установках, применяемых в мировой цементной промышленности, причем особое внимание было уделено цифровому материалу, диаграммам и таблицам.

Различие местных условий в разных странах не позволило дать однозначной оценки тому или иному способу производства. Способы производства и оборудование, которым отдают предпочтение в одной стране, часто становятся менее эффективными при изменении географических, технологических и экономических условий или при использовании на предприятиях иной мощности. Только в том случае, когда оговорены особые условия и четко задана область применения со всеми ограничениями, можно однозначно оценить способ производства. Способы производства, не имеющие перспективы дальнейшего применения, в целях ограничения объема здесь не приводятся. Также очень кратко описаны новые способы, находящиеся в начальной стадии разработки.

При работе над книгой использованы первоисточники главным образом на английском, немецком и славянских языках. Также приняты во внимание французские и японские материалы.

Издание настоящей книги по производству цемента несомненно будет способствовать обмену международным опытом, поскольку многие данные, методы расчета и т. п. из-за языковых трудностей известны специалистам только определенных территориальных регионов.

Я приношу благодарность различным фирмам, предоставившим в мое распоряжение иллюстрации и цифровой материал, библиотекарю Г. Яшуре за ценные библиографические справки, г-ну Р. Кнаппу из издательства «Бауферлаг» за многочисленные ценные советы и помощь при подготовке рукописи, а также издательству «Бауферлаг» за прекрасное оформление книги.

Вальтер Г. Дуда, Алентаун, Пенсильвания (США).

Предисловие издательства

Эта книга, являющаяся результатом многолетней работы, вызвала очень большой интерес еще до выхода из печати. Особенность ее состоит в том, что после обработки многочисленных литературных источников в нее включены такие сведения, методы расчета и технологические способы, которые раньше были известны и применялись только внутри отдельных территориальных регионов. Тем самым внесен значительный вклад во взаимное обучение специалистов по производству цемента, принадлежащих к различным языковым группам и географическим районам и обладающих различным производственным опытом. В этом заключается большое значение книги. Она помогает каждому читателю ознакомиться с образом мыслей и методами работы зарубежных коллег.

В целях ограничения объема в книге в основном приведены данные, необходимые для повседневной работы. В некоторых случаях для уточнения информации следует обратиться к первоисточникам.

Мы благодарим всех специалистов, помогавших советами при подготовке настоящей книги.

Издательство «Бауферлаг», Висбаден, ФРГ.

1. Сырье

Для производства цемента могут применяться как природные вещества, так и промышленные продукты. Исходными материалами служат минералы, содержащие главные составные части цемента: оксид кальция, кремнезем, глинозем и оксид железа. Эти компоненты редко содержатся в нужном соотношении в каком-либо одном виде сырья. Поэтому часто приходится подбирать сырьевую смесь по расчету из составляющей, богатой известью (карбонатный компонент), и составляющей, бедной известью, но содержащей кремнезем, глинозем и оксид железа (глинистый компонент). Двумя основными компонентами сырьевой смеси, как правило, служат известняк и глина или известняк и мергель.

1.1. Карбонатные породы

Содержание карбонатного компонента в цементной сырьевой смеси обычно достигает 76—80%. Поэтому химические и физические свойства этого компонента оказывают решающее влия-

ние на выбор технологии производства цемента и производственных агрегатов.

1.1.1. Известняк. Карбонат кальция CaCO_3 широко распространен в природе. Для производства портландцемента пригоден карбонат кальция всех геологических формаций. Наиболее чистыми формами известняка являются известковый шпат (кальцит) и арагонит. Известковый шпат имеет гексагональную кристаллическую структуру, а арагонит — ромбическую. Плотность известкового шпата равна 2,7, а арагонита — 2,95 т/м³. Макрозернистой разновидностью известкового шпата является мрамор. Однако использовать мрамор для производства цемента неэкономично.

Наиболее распространенными и часто похожими на мрамор формами карбоната кальция являются известняк и мел. Известняк имеет в основном мелкозернистую кристаллическую структуру. Твердость известняка определяется его геологическим возрастом: чем древнее геологическая формация, тем, как правило, тверже известняк. Твердость известняка находится в интервале от 1,8 до 3,0 по шкале твердости Мооса, а плотность — в интервале от 2,6 до 2,8 т/м³. Наиболее чистый известняк имеет белый цвет. Чаще всего в известняке содержатся примеси глинистых веществ и соединений железа, которые и определяют его цвет.

1.1.2. Мел. С точки зрения геологии мел является относительно молодой осадочной породой, образовавшейся в меловой период. В противоположность известняку мел имеет более рыхлую, землистую структуру; это свойство позволяет отнести мел к сырью, как бы специально предназначенному для мокрого способа производства цемента. Поскольку добыча мела производится без взрывных работ и, кроме того, мел не требует дробления, применение такого сырья значительно снижает стоимость производства цемента. Обычно содержание карбоната кальция в меле составляет 98—99% при незначительных примесях SiO_2 , Al_2O_3 и MgCO_3 .

1.1.3. Мергель. Известняк с примесями кремнезема и глинистых веществ, а также оксида железа называют мергелем. Мергели представляют собой переходную ступень к глинам. Благодаря широкому распространению мергели часто служат сырьем для производства цемента.

В геологическом отношении мергели относятся к осадочным породам, образовавшимся при одновременном осаждении карбоната кальция и глинистых веществ. Твердость мергеля ниже твердости известняка; чем больше глинистых веществ содержится в мергеле, тем ниже его твердость. Иногда в мергеле также содержатся битумные составляющие. Цвет мергеля зависит от глинистых веществ и меняется от желтого до серо-черного. Мергели являются прекрасным сырьем для производства цемента,

так как представляют собой однородную смесь карбонатной и глинистой составляющих.

Известковый мергель, химический состав которого соответствует составу портландцементной сырьевой смеси, применяется для производства так называемого натурального портландцемента; однако месторождения такого сырья встречаются редко. В зависимости от количественного соотношения карбонатного и глинистого компонентов в состав цементной сырьевой смеси входят различные карбонатно-глинистые породы (табл. 1.1.3.1.).

Таблица 1.1.3.1. Классификация карбонатно-глинистых пород

Порода	Содержание CaCO_3 , %
Известняк	96—100
Известняк мергелистый	90—96
Мергель известковый	75—90
Мергель	40—75
Мергель глинистый	10—40
Глина мергелистая	4—10
Глина	0—4

В табл. 1.1.3.2 приведен химический состав различных известняков и мергелей, применяющихся для производства портландцемента.

Таблица 1.1.3.2. Химический состав известняков и мергелей, %

Компонент	Извест- няк	Извест- няк	Извест- няк	Извест- няк	Мер- гель	Мер- гель	Мер- гель
SiO_2	3,76	6,75	4,91	4,74	27,98	33,20	21,32
Al_2O_3	1,10	0,71	1,28	2,00	10,87	8,22	4,14
Fe_2O_3	0,66	1,47	0,66	0,36	3,08	4,90	1,64
CaO	52,46	49,80	51,55	51,30	30,12	27,30	39,32
MgO	1,23	1,48	0,63	0,30	1,95	1,02	0,75
K_2O	0,18	Следы	Следы	0,16	0,20	0,12	0,06
Na_2O	0,22	Следы	Следы	0,28	0,33	0,18	0,08
SO_3	0,01	1,10	0,21	—	0,70	0,37	—
Потери при прока- ливании	40,38	39,65	40,76	40,86	24,68	24,59	32,62
Итого	100,00	99,96	100,00	100,00	99,91	99,90	99,93

1.2. Глинистые породы

Другим важным сырьем для производства цемента является глина. Глины в основном представляют собой продукты вывет-

ривания щелочных и щелочноземельных алюмосиликатов, таких как полевые шпаты и слюды.

Основными компонентами глин являются гидроалюмосиликаты. Глины подразделяются на следующие минеральные группы [6]: группа каолинов $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ — каолинит, диксит, накрит, галлуазит; группа монтмориллонитов — монтмориллонит $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} + n\text{H}_2\text{O}$, бейделлит $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, нонтронит $(\text{Al}, \text{Fe})_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, сапонит $2\text{MgO} \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$; группа щелочесодержащих глин — глинистые гидрослюды, включая иллит, — минералы с различным соотношением K_2O , MgO , Al_2O_3 , SiO_2 , H_2O .

Минералы группы каолинов различаются содержанием SiO_2 , кристаллографической структурой и оптическими свойствами. Название «каолинит» применяется для обозначения основного минерала группы. Глинистые минералы имеют тонкозернистую текстуру; размеры зерен, как правило, не превышают 2 мкм.

Глинистые минералы [7] имеют следующие удельные поверхности, $\text{м}^2/\text{г}$: каолин — около 15; галлуазит — около 43; иллит — около 100; монтмориллонит — около 800.

Объемная масса этих минералов составляет [8], $\text{т}/\text{м}^3$: каолина — 2,60—2,68; галлуазита — 2,00—2,20; иллита — 2,76—3,00.

Точка плавления глин находится в интервале 1150—1785°С (конус Зегера № 1—35).

Химический состав глин различен; имеются глины, содержащие чистые глинистые минералы, и глины, в состав которых входит значительное количество химических примесей, например, гидроксид железа, пирит, кварц, карбонат кальция и т. д. Гидроксид железа чаще всего является красящим компонентом глины; различную окраску глинам также могут придавать органические вещества. Глина без примесей имеет белый цвет. Главным источником появления щелочей в цементах является глинистый компонент сырьевой смеси.

Таблица 1.2.1. Химический состав глин, %

Компонент	Тип глины			
	1-й	2-й	3-й	4-й
Потери при прокаливании	7,19	8,67	10,40	6,40
SiO_2	67,29	62,56	52,30	60,10
Al_2O_3	8,97	15,77	24,70	18,00
Fe_2O_3	4,28	4,47	6,10	8,20
CaO	7,27	4,80	4,40	0,80
MgO	1,97	1,38	0,10	0,20
SO_3	0,32	—	1,10	3,80
K_2O	1,20	} 2,35	} 0,80	} 2,50
Na_2O	1,51			
Итого	100,00	100,00	99,90	100,00

В табл. 1.2.1. приведен химический состав различных глин, применяющихся при производстве портландцемента.

1.3. Корректирующие добавки

Корректирующие добавки вводят в цементную сырьевую смесь в тех случаях, когда ее химический состав не отвечает установленным требованиям. Так, например, для повышения содержания кремнезема в качестве добавки или корректирующего материала применяют песок, глину с высоким процентом кремнезема, трепел и т. д. При недостатке оксида железа в качестве корректирующего материала применяют колчеданные огарки, железную руду и т. д.

В табл. 1.3.1 приведен химический состав некоторых корректирующих материалов.

Таблица 1.3.1. Химический состав корректирующих добавок, %

Компонент	Диатомит	Боксит	Колчеданные огарки	Железная руда	Колошниковая пыль	Зола-унос	Песок
Потери при прокаливании	6,2	15—20	—	5—12	5—15	0,2—4,0	0,2
SiO ₂	77,0	16—22,0	6,6—25	20—25	11—22	26—36	99,2
Al ₂ O ₃	9,6	44—58	2—16	3—9	5—14	6,5—9,5	—
Fe ₂ O ₃			62—87	45—60	54—69	5—8	0,5
CaO	0,3	10—16	0,7—0,9	0,5—2,5	1—9	42—50	—
MgO	0,9	0,2—1,0	0,2—2	1,5—7	0,5—2,5	3—4	—
SO ₃	—	—	0,8—8	0,3—0,6	0,2—2,5	2,5—3	—
Na ₂ O	1,5	—	—	—	—	0,8—3,5	—
K ₂ O						—	—

1.4. Дополнительные компоненты сырьевой смеси

Здесь приведены материалы, содержание которых в цементе ограничивается нормами или опытными данными.

1.4.1. Оксид магния. Оксид магния в количестве около 2% по массе находится в связанном состоянии в основных клинкерных фазах и, кроме того, содержится в клинкере в виде свободного MgO (периклаз). Периклаз с водой образует Mg(OH)₂: $MgO + H_2O = Mg(OH)_2$, однако эта реакция протекает очень медленно, когда остальные реакции твердения уже завершены. Поскольку Mg(OH)₂ занимает больший объем, чем MgO, то возникает опасность разрушения цементного камня и появления усадочных трещин (магниева усадка) (см. также разд. 22.2).

В основном MgO содержится в известняке в виде доломита (CaCO₃·MgCO₃).

Иногда большое количество MgO содержится также в доменных шлаках. При использовании таких шлаков вместо глины в составе сырьевой смеси необходимо следить за тем, чтобы

содержание MgO в клинкере оставалось в допустимых пределах (см. пример 2.5 и табл. 2.5).

1.4.2. Щелочи. Щелочи вносятся с обрабатываемым сырьем — глиной и мергелями, где K_2O и Na_2O содержатся в мелкозернистом полевом шпате, включениях слюды и глинистом минерале иллите; небольшая часть щелочей образуется из угольной золы при сжигании твердого топлива [139, 245, 7a]. В Средней Европе в составе глин содержится значительно больше K_2O , чем Na_2O , а в других районах мира, например в США, в глинах содержится большее количество Na_2O (см. табл. 1.1.3.2 и 1.2.1.). При обжиге цемента во вращающихся печах часть щелочей улетучивается в зоне спекания и возникает возможность щелочной циркуляции (см. также разд. 1.4.3).

Некоторые заполнители для бетона, применяющиеся, например, в ряде районов США, Дании, ФРГ и ГДР, содержат компоненты, чувствительные к щелочам, например опал (водосодержащий кремнезем), которые вступают в реакцию со щелочами цемента, что при определенных неблагоприятных условиях может привести к неравномерному изменению объема (щелочному вспучиванию). На основе опытных данных для предотвращения щелочного вспучивания в рассматриваемом случае рекомендуют применять цемент с низким содержанием щелочей, при котором общее количество щелочей в пересчете на Na_2O ($Na_2O + 0,659 K_2O$, % по массе) не превышает 0,6% по массе. С учетом практики других стран [14] в ФРГ также введено ограничение содержания щелочей, равное 0,6% по массе в пересчете на Na_2O , однако это ограничение распространяется только на портландцемент. Было установлено, что для шлакопортландцементов можно увеличить предельное содержание щелочей, и поэтому для цементов с низкой эффективной щелочностью¹ (цемент NA) при количестве шлака до 50% допускается предельное содержание щелочей, равное 0,9%, а при количестве шлака до 65% — 2,0% по массе [7b].

В тех случаях, когда требуется цемент NA, а щелочность клинкера, полученного из имеющегося в наличии сырья, превышает допустимые пределы, необходимо удалить часть летучих щелочей путем частичного отвода (байпаса) печных газов перед их поступлением в теплообменник.

Можно отметить, что федеральные нормы США SS—C—192b, стандарты Американской ассоциации государственного дорожного строительства AASHTO и нормы ASTM ограничивают щелочность портландцемента величиной 0,6% в пересчете на Na_2O . Указанные ограничения должны соблюдаться, когда цемент вступает во взаимодействие с заполнителями для бетона, чувст-

¹ «Эффективная щелочность» обозначает здесь содержание водорастворимых щелочей. (Прим. ред.)

вительными к щелочной реакции. Однако из-за трудности разделения цементов с низкой и высокой щелочностью обычно требуют, как это принято во многих районах США, чтобы все цементы соответствовали нормам низкой щелочности (см. также [7d, 7e, 7f]).

1.4.3. Сера. Сера встречается в основном в виде сернистых соединений (пирит и марказит FeS_2) почти во всех типах цементной сырьевой смеси. При обследовании более 90 месторождений известняка в ФРГ установлено, что максимальное содержание серы (сульфатные и сульфидные соединения) равно 0,16%, а при обследовании 67 месторождений глины оно составляет в среднем 0,22%. Сернистость топлива меняется в значительных пределах — от нуля для природного газа до 3,5% для тяжелого мазута. Уголь Рурского бассейна в среднем содержит 1,1% серы [1]. При обследовании 21 цементной печи с предварительным подогревом сырья (ФРГ) установлено, что с сырьевой смесью вносится от 0,5 до 11 г SO_3 на 1 кг клинкера, а с топливом — при использовании жидкого топлива с очень высоким содержанием серы — максимум 6 г SO_3 на 1 кг клинкера [7a, 139].

При горении и газообразовании в зоне спекания печи сера, содержащаяся в топливе и сырьевой смеси, превращается в газообразный продукт SO_2 , который, вступая во взаимодействие с летучими щелочами печных газов и кислородом, образует парообразный сульфат щелочного металла, конденсирующийся на обжигаемом материале в более холодных зонах печи и подогревателе. Весь сульфат щелочного металла, за исключением небольшой части, остающейся в летучей пыли, возвращается с обжигаемым материалом в зону спекания и вследствие летучести серы разносится по клинкеру.

Если количество SO_2 недостаточно для связывания всей щелочи, то возникает циркуляция летучих карбонатов или хлоридов щелочных металлов (см. разд. 1.4.4). Углекислые соли щелочных металлов, не вошедшие в клинкерные фазы, могут снова испариться в зоне спекания.

При избытке SO_2 еще в подогревателе начинается его соединение с CaCO_3 и образование CaSO_4 , который возвращается в зону спекания. В зоне спекания снова происходит разложение CaSO_4 , что приводит к росту содержания SO_2 в циркулирующих печных газах. Однако часть неразложившегося CaSO_4 попадает в клинкер.

Наличие в сырьевой смеси избыточного количества щелочей по сравнению с количеством, нейтрализуемым при взаимодействии с серой, имеет преимущество, связанное с возможностью применения топлива с высоким содержанием серы без выпуска из печи в атмосферу отработанных газов с заметным содержанием SO_2 . Сульфат щелочного металла, связанный в клинкере, оказывает благоприятное влияние на начальную прочность це-

мента. В противоположность этому повышенное содержание серы может привести к возрастанию количества SO_2 в отходящих газах, к засорению подогревателей сырьевой смеси и образованию колец привара во вращающихся печах.

Цемент требует добавления минимального количества сульфата кальция — чаще всего в форме молотого гипса — для регулирования сроков схватывания; с другой стороны, максимально допустимое суммарное содержание SO_3 , которое должно предотвратить сульфатное вспучивание цемента, регламентировано соответствующими нормами и составляет от 2,5 до 4%. В определенных условиях при минимальных нормативных значениях SO_3 отсутствует возможность глубокой сульфатизации щелочей.

1.4.4. Хлориды. Содержание хлоридов в сырьевых смесях обычно составляет от 0,01 до 0,1% по массе, а в редких случаях превышает 0,3% [7а]. Как уже отмечалось, во вращающихся печах хлориды вступают в реакцию со щелочами, что приводит к образованию хлоридов щелочных металлов, которые отводятся с печными газами и осаждаются в подогревателе. Вместе с обжигаемым материалом они возвращаются назад в печь, однако в отличие от сульфатов щелочных металлов почти полностью испаряются в зоне спекания. Поскольку большая часть хлоридов щелочных металлов осаждается в подогревателе сырьевой смеси, между зоной спекания и подогревателем возникает циркуляция, сохраняющаяся до прекращения эксплуатации печи из-за склеивания и образования корки. Эта циркуляция должна быть ослаблена до 10—15% путем частичного отвода (байпаса) печных газов. По опытным данным, частичный отвод печных газов необходим при содержании в сырьевой смеси около 0,015% Cl по массе [7а].

Раньше для повышения начальной прочности даже к самым высококачественным цементам добавляли хлористый кальций. После того как было установлено, что хлорид способствует коррозированию стали и представляет особую опасность для напрягаемой проволоочной арматуры в предварительно напряженных бетонных конструкциях, в новом издании норм ФРГ по цементу DIN 1164 1970 г. вообще запретили добавлять в цемент хлорид; в то же время количество хлорида, попавшего в цемент при обработке сырья, ограничено 0,1% [7с, 139].

1.4.5. Фториды. Содержание фторидов в обычной цементной сырьевой смеси находится в пределах 0,03—0,08%. В отличие от хлоридов фториды из-за слабой летучести не образуют неблагоприятной циркуляции в системе печи. В настоящее время в большинстве случаев отказались от практиковавшейся ранее добавки фтористого кальция в сырьевую смесь (до 1%) для улучшения обжига клинкера, так как теперь связывание извести достигается улучшением гомогенизации и тонкости помола сырьевой смеси.

1.4.6. Фосфор. Содержание фосфора в большинстве природных цементных сырьевых смесей очень незначительно (в ФРГ содержание в клинкере P_2O_5 составляет от 0,05 до 0,25% [139]). Поскольку приходится перерабатывать материалы, богатые фосфором (например, известняк, богатый P_2O_5 , — промышленные отходы при добыче фосфора), допустимое содержание P_2O_5 в клинкере принято равным 2,5% [12b]. Однако уже при содержании P_2O_5 , превышающем 0,5%, может снизиться начальная прочность цемента [12c].

1.5. Минералогический состав портландцементного клинкера

Химический состав портландцементного клинкера дан в табл. 1.5.1.

Таблица 1.5.1. Химический состав портландцементного клинкера, %

SiO_2	16—26	CaO	58—67
Al_2O_3	4—8	MgO	1—5
Fe_2O_3	2—5	$K_2O + Na_2O$	0—1
Mn_2O_3	0—3	SO_3	0,1—2,5
TiO_2	0—0,5	P_2O_5	0—1,5

Потери при прокаливании 0,5—3

1.5.1. Портландцементный клинкер. Основные минералы, которые может содержать портландцементный клинкер, даны в табл. 1.5.2.

Клинкерные минералы не являются чистыми соединениями, а представляют собой смеси, содержащие в незначительном количестве компоненты других минералов в виде смешанных кристаллических соединений; это относится и к остальным химическим примесям клинкера, которые не могут образовать самостоятельных фаз. Поэтому, чтобы четко отличать чистые соединения от клинкерных минералов, Тёрнебом в 1897 г. дал основным минералам клинкера C_3S и C_2S названия «алит» и «белит» и, еще не зная их состава, исследовал под микроскопом отличия между ними.

1.5.2. Алит. Алит C_3S является основным клинкерным минералом, определяющим прочность цемента. Из шести известных модификаций C_3S в клинкере возникает только две¹ высокотемпературные модификации, которые стабилизируются путем включения атомов примесей [12а, 139].

1.5.3. Белит. Белит главным образом представляет собой β -форму C_2S . При температуре спекания клинкера, превышающей $1420^\circ C$, образуется α - C_2S , а при температуре до $1420^\circ C$ — α' - C_2S . Последняя форма во время охлаждения клинкера при температуре $670^\circ C$ превращается в метастабильный β - C_2S .

¹ Третья модификация — триклинная — также изредка встречается (Прим. ред.)