

(19)



**Евразийское  
патентное  
ведомство**

(11) **040455**

(13) **B1**

**(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

**(45)** Дата публикации и выдачи патента  
**2022.06.06**

**(51)** Int. Cl. **C04B 28/18** (2006.01)  
**C04B 7/345** (2006.01)

**(21)** Номер заявки  
**201791879**

**(22)** Дата подачи заявки  
**2016.03.18**

---

**(54) КОМПОЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И СВЯЗУЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ, ПОЛУЧАЕМЫЕ  
КАРБОНИЗАЦИЕЙ СИЛИКАТА КАЛЬЦИЯ, И СПОСОБЫ ИХ ПОЛУЧЕНИЯ И  
ПРИМЕНЕНИЯ**

---

**(31)** 62/136,201; 62/136,208

**(32)** 2015.03.20

**(33)** US

**(43)** 2018.04.30

**(86)** PCT/US2016/023193

**(87)** WO 2016/154024 2016.09.29

**(71)(73)** Заявитель и патентовладелец:  
**СОЛИДИА ТЕКНОЛОДЖИЗ, ИНК.**  
**(US)**

**(72)** Изобретатель:  
**Атакан Вахит, Саху Садананда, Куинн  
Шон, Декристофаро Николас (US),  
Мейер Венсан, Компаре Седрик,  
Валента Гюнтер (FR)**

**(74)** Представитель:  
**Микуцкая Т.Ю., Файбисович А.С.,  
Рогова Е.В. (RU)**

**(56)** JP-A-2001278679

D. DAVAL ET AL: "Mechanism of wollastonite carbonation deduced from micro-to nanometer length scale observations", THE AMERICAN MINERALOGIST, vol. 94, no. 11-12, 1 November 2009 (2009-11-01), pages 1707-1726, XP055126736, ISSN: 0003-004X, DOI: 10.2138/am.2009.3294, the whole document

WO-A1-2009132692

WO-A2-2012122031

WO-A1-2015090533

WO-A1-2016022485

GB-A-1174919

GB-A-1361713

---

**(57)** В изобретении предлагаются композитные материалы, включающие новые связующие элементы, характеризующиеся уникальными микроструктурами и химическими составами, и способы их получения и применения, например, в качестве компонентов различных бетонов в объектах инфраструктуры, сооружениях, дорожных покрытиях и ландшафтной архитектуре.

---

**B1**

**040455**

**040455 B1**

### **Притязания на приоритет и родственные заявки на патент**

Эта заявка испрашивает приоритет предварительных заявок на патент США № 62/136201 и № 62/136208, которые обе были зарегистрированы 20 марта 2015 года, содержание каждой из которых включено в изобретение путем ссылки на них.

### **Область техники, к которой относится изобретение**

В целом, изобретение относится к композициям силиката кальция. Более конкретно, изобретение относится к композитным материалам, включающим новые связующие элементы, характеризующиеся уникальными микроструктурами и химическими составами, и к способам их получения и применения, например, в качестве компонентов различных бетонов в объектах инфраструктуры, сооружениях, дорожных покрытиях и ландшафтной архитектуре.

### **Уровень техники**

Бетон является самым потребляемым в мире искусственным материалом. Обычный бетон получают путем смешивания портландцемента, воды и заполнителей, таких как песок и щебень. Портландцемент представляет собой синтетический материал, полученный путем обжига смеси измельченного известняка и глины или материалов подобного состава во вращающейся обжиговой печи при температуре спекания 1450°C. Производство портландцемента является не только энергоемким процессом, но и процессом, при котором выбрасывается в атмосферу значительное количество газа (CO<sub>2</sub>), вызывающего парниковый эффект. На цементную промышленность приходится около 5% мировых антропогенных выбросов CO<sub>2</sub>. Более 60% количества этого CO<sub>2</sub> образуется в результате химического разложения или кальцинирования известняка.

В настоящее время предпринимаются все более активные усилия по сокращению суммарного объема выбросов CO<sub>2</sub> в цементной промышленности. Согласно предложению Международного энергетического агентства в цементной промышленности необходимо сократить выбросы CO<sub>2</sub> в атмосферу с 2,0 Гт (гигатонн) в 2007 году до 1,55 Гт к 2050 году. Это является сложной задачей, поскольку за этот же период производство цемента, согласно прогнозам, должно вырасти с 2,6 до 4,4 Гт.

Для решения этой сложной задачи недавно был разработан революционный метод производства цемента, который позволяет значительно уменьшить потребление энергии и выбросы CO<sub>2</sub> для цементного завода. Уникальный цемент состоит из обладающих способностью к карбонизации композиций силиката кальция и изготавливается из широко доступного недорогого сырья, и он позволяет непрерывно и безопасно улавливать CO<sub>2</sub>, будучи при этом адаптируемым и легко приспособляемым к существующему оборудованию и технологическим требованиям, что дает возможность производителям традиционного цемента легко переходить на новый способ производства.

Для того чтобы повысить прочность сцепления и эффективность производства, а также уменьшить эксплуатационные затраты и выбросы углекислого газа в атмосферу, необходимо разработать новые связующие микроструктуры и композиционные материалы, которые соответствуют или превосходят физические и эксплуатационные характеристики существующих компонентов бетонных смесей.

### **Сущность изобретения**

В изобретении предлагаются новые композиционные материалы и связующие элементы, характеризующиеся уникальными микроструктурами и химическими составами, и способы их получения и применения, например, в качестве различных компонентов бетона в объектах инфраструктуры, сооружениях, дорожных покрытиях и ландшафтной архитектуре. Раскрытые в изобретении композиционные материалы и связующие элементы получают путем карбонизации подходящих материалов из силикатов кальция (например, клинкера и цемента), которые могут быть получены из широкодоступного недорогого сырья с помощью процессов, подходящих для использования в крупномасштабном промышленном производстве. Способ по изобретению является легко приспособляемым к существующему оборудованию и технологическим условиям, и его можно легко применять на промышленных предприятиях, производящих традиционный портландцемент. Раскрытые в изобретении новые композиционные материалы и присутствующие в них связующие элементы могут быть использованы в различных бетонах, применяемых в сооружениях, дорожных покрытиях и ландшафтной архитектуре, а также в объектах инфраструктуры, при уменьшении потребности в оборудовании, снижении энергопотребления и более приемлемом выбросе в атмосферу углекислого газа.

В одном аспекте изобретение в целом относится к композитному материалу, получаемому карбонизацией силиката кальция с помощью CO<sub>2</sub>. Композитный материал включает множество связующих элементов одного или более типов (микроструктур). Эти типы связующих элементов включают связующий элемент, включающий ядро не прореагировавшей обладающей способностью к карбонизации фазы силиката кальция, полностью или частично окруженное обогащенным диоксидом кремния корковым слоем различной толщины, который полностью или частично заключен в оболочку из частиц CaCO<sub>3</sub>; связующий элемент, включающий ядро из диоксида кремния, образовавшегося в результате карбонизации обладающей способностью к карбонизации фазы силиката кальция, полностью или частично окруженное обогащенным диоксидом кремния корковым слоем различной толщины который, полностью или частично заключенным в оболочку из частиц CaCO<sub>3</sub>; связующий элемент, включающий ядро из диоксида кремния, образовавшегося в результате карбонизации обладающей способностью к карбонизации фазы

силиката кальция, полностью или частично заключенное в оболочку из частиц  $\text{CaCO}_3$ ; связующий элемент, включающий ядро не обладающей способностью к карбонизации фазы, полностью или частично заключенное в оболочку из частиц  $\text{CaCO}_3$ ; связующий элемент, включающий многофазное ядро, состоящее из диоксида кремния, образовавшегося в результате карбонизации обладающей способностью к карбонизации фазы силиката кальция, и частично прореагировавшего силиката кальция, где многофазное ядро полностью или частично окружено обогащенным диоксидом кремния корковым слоем различной толщины который полностью или частично заключен в оболочку из частиц  $\text{CaCO}_3$ ; связующий элемент, включающий многофазное ядро, состоящее из не обладающей способностью к карбонизации фазы и частично прореагировавшего силиката кальция, где многофазное ядро полностью или частично окружено обогащенным диоксидом кремния корковым слоем различной толщины, который полностью или частично заключен в оболочку из частиц  $\text{CaCO}_3$ ; связующий элемент, включающий частицы частично прореагировавшего силиката кальция без четко выраженного ядра и корковый слой из диоксида кремния, заключенного в оболочку из частиц  $\text{CaCO}_3$ ; и связующий элемент, включающий пористые частицы без четко выраженного коркового слоя из диоксида кремния, заключенные в оболочку из частиц  $\text{CaCO}_3$ . В совокупности множество связующих элементов образует сопряженную связующую матрицу, обеспечивающую прочность сцепления и фиксирующую композитный материал.

В другом аспекте изобретение в целом относится к связующей матрице, включающей множество связующих элементов. Связующие элементы выбирают из связующего элемента, включающего ядро не прореагировавшей обладающей способностью к карбонизации фазы силиката кальция, полностью или частично окруженное обогащенным диоксидом кремния корковым слоем различной толщины, который полностью или частично заключен в оболочку из частиц  $\text{CaCO}_3$ ; связующего элемента, включающего ядро из диоксида кремния, образовавшегося в результате карбонизации обладающей способностью к карбонизации фазы силиката кальция, полностью или частично окруженное обогащенным диоксидом кремния корковым слоем различной толщины, который полностью или частично заключен в оболочку из частиц  $\text{CaCO}_3$ ; связующего элемента, включающего ядро из диоксида кремния, образовавшегося в результате карбонизации обладающей способностью к карбонизации фазы силиката кальция, полностью или частично заключенное в оболочку из частиц  $\text{CaCO}_3$ ; связующего элемента, включающего ядро не обладающей способностью к карбонизации фазы, полностью или частично заключенной в оболочку из частиц  $\text{CaCO}_3$ ; связующего элемента, включающего многофазное ядро, состоящее из диоксида кремния, образовавшегося в результате карбонизации обладающей способностью к карбонизации фазы силиката кальция, и частично прореагировавшего силиката кальция, где многофазное ядро полностью или частично окружено обогащенным диоксидом кремния корковым слоем различной толщины, который полностью или частично заключен в оболочку из частиц  $\text{CaCO}_3$ ; связующего элемента, включающего многофазное ядро, состоящее из не обладающей способностью к карбонизации фазы и частично прореагировавшего силиката кальция, где многофазное ядро полностью или частично окружено обогащенным диоксидом кремния корковым слоем различной толщины, который полностью или частично заключен в оболочку из частиц  $\text{CaCO}_3$ ; связующего элемента, включающего частицы частично прореагировавшего силиката кальция без четко выраженного ядра, и корковый слой из диоксида кремния, заключенный в оболочку из частиц  $\text{CaCO}_3$ ; и связующего элемента, включающего пористые частицы без четко выраженного коркового слоя из диоксида кремния, заключенные в оболочку из частиц  $\text{CaCO}_3$ .

В еще одном аспекте изобретение в целом относится к способу получения композитного материала, включающего раскрытые связующие элементы.

#### **Краткое описание чертежей**

Задачи и отличительные признаки изобретения могут быть лучше поняты при ссылке на описанные ниже чертежи и пункты формулы изобретения. Чертежи необязательно изображены при соблюдении соответствующего масштаба, в данном случае обычно преследуется цель проиллюстрировать принципы изобретения. Одинаковые цифры на чертежах используют для обозначения одинаковых частей на всех без исключения различных проекциях.

На фиг. 1(a)-1(f) приведены схематические изображения примеров связующих элементов в соответствии с примерами вариантов осуществления настоящего изобретения.

На фиг. 2(a)-2(f) приведены схематические изображения вида с боку и видов в разрезе композитных материалов в соответствии с примерами вариантов осуществления настоящего изобретения, при этом на фиг. 2(a) изображены 1D ориентированные связующие элементы в форме волокон в разбавленной связующей матрице (связующие элементы не находятся в соприкосновении), на фиг. 2(b) изображены 2D ориентированные связующие элементы в пластинчатой форме в разбавленной связующей матрице (связующие элементы не находятся в соприкосновении), на фиг. 2(c) изображены 3D ориентированные связующие элементы в пластинчатой форме в разбавленной связующей матрице (связующие элементы не находятся в соприкосновении), на фиг. 2(d) изображены случайным образом ориентированные связующие элементы в пластинчатой форме в разбавленной связующей матрице (связующие элементы не находятся в соприкосновении), где композитные материалы включают связующую матрицу и компоненты наполнителей, таких как полимеры, металлы, неорганические частицы, заполнители и так далее, на фиг. 2(e) изображена концентрированная связующая матрица (с объемным содержанием, достаточным для

формирования перколяционной сетчатой структуры) из связующих элементов, где матрица является 3D ориентированной, на фиг. 2(f) изображена концентрированная связующая матрица (с объемным содержанием, достаточным для формирования перколяционной сетчатой структуры) из ориентированных случайным образом связующих элементов, в которую могут быть введены компоненты наполнителей, таких как полимеры, металлы, неорганические частицы, наполнители и так далее.

На фиг. 3 приведена схема камеры отверждения композитного материала в атмосфере  $\text{CO}_2$ , в которой обеспечивается увлажнение в соответствии с принципами изобретения.

На фиг. 4 приведена схема камеры отверждения с применением разнообразных методов регулирования влажности, а также со способностью регулировать и восполнять количество  $\text{CO}_2$ , используя регулирование постоянства потока или регулирование давления, в которой можно регулировать температуру в соответствии с принципами изобретения.

На фиг. 5 приведено изображение в обратно-рассеянных электронах (BSE) прореагировавших частиц цемента. На изображении отображено с повышенной яркостью реакционноспособное ядро фазы частиц с корковым слоем из диоксида кремния различной толщины и заключенное в оболочку из  $\text{CaCO}_3$  (1). Также на изображении отображена фаза инертных частиц, полностью заключенная в оболочку из  $\text{CaCO}_3$  (2). Также на изображении отображено с повышенной яркостью многофазное ядро, состоящее из реакционноспособных фаз, и со средней степенью яркости аморфная фаза с корковым слоем из диоксида кремния и частиц  $\text{CaCO}_3$  (3).

На фиг. 6 приведен микрофотоснимок композита в условных цветах, на котором обнаруживаются различные частицы экспериментального цемента 1. Видны однофазные и многофазные частицы с разнообразными составами.

На фиг. 7 приведен микрофотоснимок композита в условных цветах, на котором обнаруживаются различные частицы экспериментального цемента 1. Видны однофазные и многофазные частицы с разнообразными составами.

На фиг. 8 приведен микрофотоснимок композита в условных цветах, на котором обнаруживаются различные частицы экспериментального цемента 1. Видны однофазные и многофазные частицы с разнообразными составами.

На фиг. 9 приведено изображение в обратно-рассеянных электронах (BSE) прореагировавших частиц цемента. На изображении отображено с низкой яркостью обогащенное  $\text{SiO}_2$  ядро частицы, заключенное в оболочку из  $\text{CaCO}_3$  (1). Другая частица, отображаемая с высокой яркостью, представляет собой ядро реакционноспособной фазы, окруженное низкоконтрастным корковым слоем из  $\text{SiO}_2$  и полностью заключенное в оболочку из  $\text{CaCO}_3$  (2). Другая отображаемая частица представляет собой многофазное ядро, состоящее из перемешанных высококонтрастной реакционноспособной фазы и аморфной фазы, отображаемой со средней степенью контрастности. Ядро частицы окружено на некоторых поверхностях низкоконтрастным корковым слоем из  $\text{SiO}_2$  и частично заключено в оболочку из  $\text{CaCO}_3$  (3).

На фиг. 10 приведено изображение в обратно-рассеянных электронах (BSE) прореагировавших частиц цемента. На изображении отображено с высокой яркостью реакционноспособная частица, окруженная корковым слоем различной толщины из диоксида кремния (1). Частица заключена в оболочку из  $\text{CaCO}_3$ , на которой виден корковый слой из диоксида кремния. Некоторые частицы с высокой контрастностью на изображении характеризуются толстым корковым слоем из диоксида кремния, что является доказательством интенсивного протекания реакции (2). Если реакция протекает до конца, то частицы отображаются в виде инертных ядер, заключенных в оболочку из  $\text{CaCO}_3$  (3). Отображена многофазная частица, состоящая из высококонтрастной реакционноспособной фазы и низкоконтрастной фазы  $\text{SiO}_2$  (4). Реакционноспособная часть частицы имеет корковый слой из диоксида кремния, и ядро частицы частично заключено в оболочку из  $\text{CaCO}_3$ .

На фиг. 11 приведено изображение в обратно-рассеянных электронах (BSE) плотной прореагировавшей цементной пасты. На изображении отображено несколько примеров структур ядро - оболочка, образующихся в результате реакции многофазных частиц цемента.

На фиг. 12 приведено изображение в обратно-рассеянных электронах (BSE) плотной прореагировавшей цементной пасты. На изображении отображена крупная многофазная частица с областями, обогащенными диоксидом кремния, что указывает на существование структуры реакционноспособная частица - частица с пустотами.

### **Подробное описание изобретения**

В изобретении предлагаются новые композиционные материалы и связующие элементы, характеризующиеся уникальными микроструктурами, химическими составами и прочностью сцепления, а также способы их получения и применения, например, в качестве различных компонентов бетона в объектах инфраструктуры, сооружениях, дорожных покрытиях и ландшафтной архитектуре. Раскрытые в изобретении композиционные материалы и связующие элементы получают путем карбонизации подходящих материалов из силикатов кальция (например, клинкера и цемента на основе силиката кальция), которые могут быть получены из широкодоступного недорогостоящего сырья с помощью процессов, подходящих для использования в крупномасштабном промышленном производстве. Способ по изобретению является легко приспособляемым к существующему оборудованию и технологическим условиям, и его можно

легко применять на промышленных предприятиях, производящих традиционный портландцемент.

Композитные материалы могут быть получены со значительно меньшим расходом энергии и выбросами  $\text{CO}_2$  в атмосферу и могут быть использованы в различных областях применения бетона. Сырье включает материалы-предшественники, такие как частицы силиката кальция (например, измельченный волластонит), которые образуют связующие элементы. Применяется также жидкий компонент в качестве реакционной среды, включающий жидкую воду и/или водяной пар. Диоксид углерода ( $\text{CO}_2$ ) потребляется в качестве реакционноспособного соединения в процессе карбонизации, что приводит к фактическому секвестированию  $\text{CO}_2$ . Для корректировки внешнего вида и механических свойств получаемого композитного материала могут быть использованы различные добавки.

#### **Связующие элементы и композитные материалы**

В одном аспекте изобретение в целом относится к композитному материалу, полученному карбонизацией силиката кальция с помощью  $\text{CO}_2$ . Композитный материал включает множество связующих элементов с одним или более типами микроструктур, выбранных из: связующего элемента, включающего ядро из не прореагировавшей обладающей способностью к карбонизации фазы силиката кальция, полностью или частично окруженное обогащенным диоксидом кремния корковым слоем различной толщины, который полностью или частично заключен в оболочку из частиц  $\text{CaCO}_3$ ; связующего элемента, включающего ядро из диоксида кремния, образовавшегося в результате карбонизации обладающей способностью к карбонизации фазы силиката кальция, полностью или частично окруженное обогащенным диоксидом кремния корковым слоем различной толщины, который полностью или частично заключен в оболочку из частиц  $\text{CaCO}_3$ ; связующего элемента, включающего ядро из диоксида кремния, образовавшегося в результате карбонизации обладающей способностью к карбонизации фазы силиката кальция, полностью или частично заключенное в оболочку из частиц  $\text{CaCO}_3$ ; связующего элемента, включающего ядро не обладающей способностью к карбонизации фазы, полностью или частично заключенное в оболочку из частиц  $\text{CaCO}_3$ ; связующего элемента, включающего многофазное ядро, состоящее из диоксида кремния, образовавшегося в результате карбонизации обладающей способностью к карбонизации фазы силиката кальция, и частично прореагировавшего силиката кальция, где многофазное ядро полностью или частично окружено обогащенным диоксидом кремния корковым слоем различной толщины, который полностью или частично заключен в оболочку из частиц  $\text{CaCO}_3$ ; связующего элемента, включающего многофазное ядро, состоящее из не обладающей способностью к карбонизации фазы и частично прореагировавшего силиката кальция, где многофазное ядро полностью или частично окружено обогащенным диоксидом кремния корковым слоем различной толщины, который полностью или частично заключен в оболочку из частиц  $\text{CaCO}_3$ ; связующего элемента, включающего частицы частично прореагировавшего силиката кальция без четко выраженного ядра и корковый слой из диоксида кремния, заключенного в оболочку из частиц  $\text{CaCO}_3$ ; и связующего элемента, включающего пористые частицы без четко выраженного коркового слоя из диоксида кремния, заключенные в оболочку из частиц  $\text{CaCO}_3$ . В совокупности множество связующих элементов образует сопряженную связующую матрицу, обеспечивающую прочность сцепления и фиксирующую композитный материал.

В другом аспекте изобретение в целом относится к связующей матрице, включающей множество связующих элементов. Связующие элементы выбирают из связующего элемента, включающего ядро не прореагировавшей обладающей способностью к карбонизации фазы силиката кальция, полностью или частично окруженное обогащенным диоксидом кремния корковым слоем различной толщины, который полностью или частично заключен в оболочку из частиц  $\text{CaCO}_3$ ; связующего элемента, включающего ядро из диоксида кремния, образовавшегося в результате карбонизации обладающей способностью к карбонизации фазы силиката кальция, полностью или частично окруженное обогащенным диоксидом кремния корковым слоем различной толщины, который полностью или частично заключен в оболочку из частиц  $\text{CaCO}_3$ ; связующий элемент, включающий ядро из диоксида кремния, образовавшегося в результате карбонизации обладающей способностью к карбонизации фазы силиката кальция, и полностью или частично заключенное в оболочку из частиц  $\text{CaCO}_3$ ; связующего элемента, включающего ядро не обладающей способностью к карбонизации фазы, полностью или частично заключенное в оболочку из частиц  $\text{CaCO}_3$ ; связующего элемента, включающего многофазное ядро, состоящее из диоксида кремния, образовавшегося в результате карбонизации обладающей способностью к карбонизации фазы силиката кальция, и частично прореагировавший силикат кальция, где многофазное ядро полностью или частично окружено обогащенным диоксидом кремния корковым слоем различной толщины, который полностью или частично заключен в оболочку из частиц  $\text{CaCO}_3$ ; связующего элемента, включающего многофазное ядро, состоящее из не обладающей способностью к карбонизации фазы и частично прореагировавшего силиката кальция, где многофазное ядро полностью или частично окружено обогащенным диоксидом кремния корковым слоем различной толщины, который полностью или частично заключен в оболочку из частиц  $\text{CaCO}_3$ ; связующего элемента, включающего частицы частично прореагировавшего силиката кальция без четко выраженного ядра и корковый слой из диоксида кремния, заключенный в оболочку из частиц  $\text{CaCO}_3$ ; и связующего элемента, включающего пористые частицы без четко выраженного коркового слоя из диоксида кремния, заключенные в оболочку из частиц  $\text{CaCO}_3$ .

Обогащенный диоксидом кремния корковый слой обычно имеет различную толщину внутри свя-

зующего элемента и от одного связующего элемента к другому связующему элементу, обычно изменяясь в диапазоне от приблизительно 0,01 мкм до приблизительно 50 мкм. В конкретных предпочтительных вариантах осуществления обогащенный диоксидом кремния корковый слой имеет толщину в диапазоне от приблизительно 1 мкм до приблизительно 25 мкм. Используемый в изобретение термин "обогащенный диоксидом кремния" обычно относится к содержанию диоксида кремния, которое является значительным по отношению к другим компонентам материала, например к содержанию диоксида кремния, превышающему приблизительно 50% по объему. Остальная часть обогащенного диоксидом кремния коркового слоя состоит в основном из  $\text{CaCO}_3$ , например, от 10% до приблизительно 50% по объему  $\text{CaCO}_3$ . Обогащенный диоксидом кремния корковый слой может также включать инертные или непрореагировавшие частицы, например, от 10% до приблизительно 50% по объему мелилита. Обогащенный диоксидом кремния корковый слой обычно характеризуется переходом от состояния, при котором он состоит в основном из диоксида кремния, до состояния, при котором он состоит в основном из  $\text{CaCO}_3$ . Диоксид кремния и  $\text{CaCO}_3$  могут присутствовать в форме смешанных или дискретных областей.

Используемый в изобретении термин "обладающий способностью к карбонизации" относится к материалу, который может взаимодействовать с  $\text{CO}_2$  в результате протекания реакции карбонизации при раскрытых в изобретении условиях. Материал является "не обладающим способностью к карбонизации", если он не взаимодействует с  $\text{CO}_2$  в результате протекания реакции карбонизации при раскрытых в изобретении условиях. Термины "реакционноспособная фаза" и "обладающая способностью к карбонизации фаза" используются взаимозаменяемо для обозначения фазы материала, которая обладает способностью к карбонизации, как это определено в изобретении. Термины "инертная фаза" и "не обладающая способностью к карбонизации фаза" используются взаимозаменяемо для обозначения фазы материала, которая не обладает способностью к карбонизации, как это определено в изобретении. Примеры обладающих способностью к карбонизации фаз или реакционноспособных фаз включают  $\text{CS}$  (волластонит или псевдоволластонит, которые иногда изображают в виде формул  $\text{CaSiO}_3$  или  $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ),  $\text{C}_3\text{S}_2$  (ранкинит, который иногда изображают в виде формул  $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7$  или  $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2$ ),  $\text{C}_2\text{S}$  (белит,  $\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$  или ларнит,  $\text{Ca}_7\text{Mg}(\text{SiO}_4)_4$  или бредигит,  $\alpha\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$  или  $\gamma\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ , которые иногда изображают в виде формул  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$  или  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ). Аморфные фазы могут также обладать способностью к карбонизации в зависимости от их состава. Примеры не обладающих способностью к карбонизации фаз или инертных фаз включают мелилит  $((\text{Ca}, \text{Na}, \text{K})_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}, \text{Al}, \text{Si})_3\text{O}_7)$  и кристаллический диоксид кремния ( $\text{SiO}_2$ ).

Обогащенный диоксидом кремния корковый слой также характеризуется различными содержаниями диоксида кремния от одного связующего элемента к другому связующему элементу, обычно изменяясь в диапазоне от приблизительно 50% до приблизительно 90% по объему (например, от приблизительно 60% до приблизительно 80%). В конкретных вариантах осуществления обогащенный диоксидом кремния корковый слой обычно характеризуется содержанием диоксида кремния, изменяющимся в диапазоне от 50% до приблизительно 90% по объему, и содержанием  $\text{CaCO}_3$ , изменяющимся в диапазоне от приблизительно 10% до приблизительно 50% по объему. В конкретных вариантах осуществления обогащенный диоксидом кремния корковый слой характеризуется содержанием диоксида кремния, изменяющимся в диапазоне от приблизительно 70% до приблизительно 90% по объему, и содержанием  $\text{CaCO}_3$ , изменяющимся в диапазоне от приблизительно 10% до приблизительно 30% по объему. В конкретных вариантах осуществления обогащенный диоксидом кремния корковый слой характеризуется содержанием диоксида кремния, изменяющимся в диапазоне от приблизительно 50% до приблизительно 70% по объему, и содержанием  $\text{CaCO}_3$ , изменяющимся в диапазоне от приблизительно 30% до приблизительно 50% по объему.

Обогащенный диоксидом кремния корковый слой может окружать ядро с той или иной степенью охвата в каком угодно месте от приблизительно 1% до приблизительно 99% (например, от приблизительно 10% до приблизительно 90%). В конкретных вариантах осуществления обогащенный диоксидом кремния корковый слой окружает ядро со степенью охвата менее чем приблизительно 10%. В конкретных вариантах осуществления обогащенный диоксидом кремния корковый слой различной толщины окружает ядро со степенью охвата более чем приблизительно 90%.

Множество связующих элементов могут иметь любой подходящий средний размер частиц и любое подходящее распределение частиц по размерам, в зависимости от требуемых свойств и эксплуатационных характеристик композитного продукта. В конкретных вариантах осуществления, например, множество связующих элементов имеет средний размер частиц в диапазоне от приблизительно 1 мкм до приблизительно 100 мкм (например, от приблизительно 1 мкм до приблизительно 80 мкм, от приблизительно 1 мкм до приблизительно 60 мкм, от приблизительно 1 мкм до приблизительно 50 мкм, от приблизительно 1 мкм до приблизительно 40 мкм, от приблизительно 1 мкм до приблизительно 30 мкм, от приблизительно 1 мкм до приблизительно 20 мкм, от приблизительно 1 мкм до приблизительно 10 мкм, от приблизительно 5 мкм до приблизительно 90 мкм, от приблизительно 5 мкм до приблизительно 80 мкм, от приблизительно 5 мкм до приблизительно 70 мкм, от приблизительно 5 мкм до приблизительно 60 мкм, от приблизительно 5 мкм до приблизительно 50 мкм, от приблизительно 5 мкм до приблизительно 40 мкм, от приблизительно 10 мкм до приблизительно 80 мкм, от приблизительно 10 мкм до прибли-

зительно 70 мкм, от приблизительно 10 мкм до приблизительно 60 мкм, от приблизительно 10 мкм до приблизительно 50 мкм, от приблизительно 10 мкм до приблизительно 40 мкм, от приблизительно 10 мкм до приблизительно 30 мкм, от приблизительно 10 мкм до приблизительно 20 мкм).

Частицы цемента с конкретными микроструктурами могут в большей степени подходить для образования раскрытой в изобретении связующей матрицы. Обычно частицы цемента могут быть подразделены на две группы: однофазные частицы и многофазные частицы.

Однофазные частицы могут существовать в различных формах, включающих: (i) реакционноспособный (обладающий способностью к карбонизации) волластонит ( $\text{CaSiO}_3$ ), ранкинит ( $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7$ ) и  $\text{C}_2\text{S}$  ( $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ); (ii) частично реакционноспособные фазы различных составов; и (iii) инертные (не обладающие способностью к карбонизации) фазы, такие как мелилит ( $(\text{Ca}, \text{Na}, \text{K})_2 [(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}, \text{Al}, \text{Si})_3\text{O}_7]$ ) и кристаллический диоксид кремния ( $\text{SiO}_2$ ).

Многофазные частицы могут существовать в различных формах, включающих:

(i) "реакционноспособную реакционноспособную" форму, то есть комбинацию двух или более реакционноспособных фаз (например,  $\text{CaSiO}_3$ ,  $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7$ ,  $\text{Ca}_2\text{SiO}_3$ );

(ii) "реакционноспособную - инертную" форму, то есть комбинацию по меньшей мере одной реакционноспособной фазы (например,  $\text{CaSiO}_3$ ,  $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7$ ,  $\text{Ca}_2\text{SiO}_3$ ) и по меньшей мере одной инертной фазы (например,  $(\text{Ca}, \text{Na}, \text{K})_2 [(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}, \text{Al}, \text{Si})_3\text{O}_7]$ ,  $\text{SiO}_2$ );

(iii) "инертную - инертную" форму, то есть комбинацию двух или более инертных фаз (например,  $(\text{Ca}, \text{Na}, \text{K})_2 [(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}, \text{Al}, \text{Si})_3\text{O}_7]$ ,  $\text{SiO}_2$ );

(iv) "реакционноспособную - частично реакционноспособную" форму, то есть комбинацию по меньшей мере одной реакционноспособной фазы (например,  $\text{CaSiO}_3$ ,  $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7$ ,  $\text{Ca}_2\text{SiO}_3$ ) с частично реакционноспособной аморфной фазой;

(v) "инертную - частично реакционноспособную" форму, то есть комбинацию по меньшей мере одной инертной фазы (например,  $(\text{Ca}, \text{Na}, \text{K})_2 [(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}, \text{Al}, \text{Si})_3\text{O}_7]$ ,  $\text{SiO}_2$ ) с частично реакционноспособной аморфной фазой;

(vi) "реакционноспособную - незначительно реакционноспособную - инертную" форму, то есть комбинацию по меньшей мере одной реакционноспособной фазы (например,  $\text{CaSiO}_3$ ,  $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7$ ,  $\text{Ca}_2\text{SiO}_3$ ) по меньшей мере с одной инертной фазой (например,  $(\text{Ca}, \text{Na}, \text{K})_2 [(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}, \text{Al}, \text{Si})_3\text{O}_7]$ ,  $\text{SiO}_2$ ) и частично реакционноспособной аморфной фазой; и

(vii) форму содержащих пустоты частиц, где частица из одной из указанных выше категорий не обладает максимальной плотностью и имеет внутренние или поверхностные соединенные друг с другом пустоты.

На фиг. 1(a)-1(f) приведены схематические изображения примеров связующих элементов в соответствии с примерами вариантов осуществления настоящего изобретения. На фиг. 1(a) изображены однофазная реакционноспособная частица (1) и различные примеры связующих элементов, которые могут быть из нее получены. На изображении (5), например, показана микроструктура, в которой образование оболочек из  $\text{CaCO}_3$  происходит только рядом с корковым слоем из диоксида кремния, образовавшимся в результате реакции силиката кальция). На фиг. 1(b) изображены однофазная инертная частица (1) и различные примеры связующих элементов, которые могут быть из нее получены. На фиг. 1(c) изображены двухфазная реакционноспособная частица (1) и различные примеры связующих элементов, которые могут быть из нее получены. На фиг. 1(d) изображены двухфазная инертная частица (1) и различные примеры связующих элементов, которые могут быть из нее получены. На фиг. 1(e) изображены многофазные реакционноспособные частицы (1) (a), (1) (b), (1) (c) и так далее и различные примеры связующих элементов, которые могут быть получены из многофазной реакционноспособной частицы (2). На фиг. 1(f) изображены однофазная реакционноспособная частица с пустотами и примеры связующих элементов, которые могут быть получены. Следует отметить, что эти связующие элементы приводятся в качестве примеров и изображены с целью иллюстрации и эти изображения не отражают реальных или относительных форм частиц или их размеров.

Связующий элемент может характеризоваться любым размером и любой регулярной или нерегулярной, твердой или полый структурой, которые могут достигаться, в любом случае, за счет выбора сырья и технологического процесса с учетом предполагаемого применения. Примеры структур включают кубы, кубоиды, призмы, диски, пирамиды, полиэдры или многогранные частицы, цилиндры, шарики, конусы, кольца, трубки, серповидные частицы, иглы, волокна, нити, хлопья, сферы, почти сфероидальные частицы, гранулы, гроздь, зерна, частицы продолговатой формы, стержни, чешуйки и так далее.

В конкретных вариантах осуществления связующий элемент или связующая матрица может иметь одну или более пустот. Пустоты могут присутствовать в однофазных или многофазных ядрах или в связующих элементах без четко выраженных ядер. Пустоты могут присутствовать в реакционноспособных фазах или в инертных фазах. Пустоты могут присутствовать в образующейся оболочке из  $\text{CaCO}_3$ . Таким образом, пустоты могут присутствовать внутри связующего элемента или расположены в пространстве между связующими элементами. Пустоты могут быть внутренними или поверхностными, изолированными или сообщающимися пустотами.

Внутри связующей матрицы, связующие элементы могут быть расположены относительно друг

друга в любой одной из целого ряда ориентации. На фиг. 2(a)-2(f) приведено схематическое изображение примера связующей матрицы, которая включает связующие элементы в форме волокон или пластин в различных ориентациях, по возможности разбавленных путем введения материала заполнителя, изображенного в пространстве между связующими элементами. На фиг. 2(a), например, изображена связующая матрица, которая включает связующие элементы в форме волокон, расположенных в однонаправленной ("1-D") ориентации (например, расположенных в направлении оси x). На фиг. 2(b) изображена связующая матрица, которая включает связующие элементы в форме пластинок, расположенных в двунаправленной ("2-D") ориентации (например, расположенных в направлении оси x и оси y). На фиг. 2(c) изображена связующая матрица, которая включает связующие элементы в форме пластинок, расположенных в трехнаправленной ("3-D") ориентации (например, расположенных в направлении осей x, y и z). На фиг. 2(d) изображена связующая матрица, которая включает связующие элементы в форме пластинок, расположенных в разупорядоченной ориентации, при которой связующие элементы не располагаются в каком-либо конкретном направлении. На фиг. 2(e) изображена связующая матрица, которая включает относительно высокую концентрацию связующих элементов в форме пластинок, которые расположены в 3-D ориентации. На фиг. 2(f) изображена связующая матрица, которая включает относительно низкую концентрацию связующих элементов в форме пластинок, которые имеют разупорядоченную ориентацию (перколяционную сетчатую структуру). Композитный материал, изображенный на фиг. 2(f), достигает порога перколяции вследствие того, что большая часть связующих элементов соприкасается друг с другом, в результате чего образуются непрерывная сетчатая структура контактов из одного конца материала до другого конца материала. Порог перколяции представляет собой критическую концентрацию, выше которой связующие элементы начинают проявлять способность образовывать связи на большом расстоянии или при упорядоченной ориентации, например, как на фиг. 2(e), или при разупорядоченной ориентации, например, как на фиг. 2(f), связующих элементов. Примеры типов образования связей можно найти, например, в публикации Newnham, et al., "Connectivity and piezoelectric-pyroelectric composites", *Mat. Res. Bull.* Vol. 13, pp. 525-536, 1978.

Связующая матрица может также включать множество крупных или мелких частиц заполнителя, который может представлять собой любой подходящий материал, имеющий любой подходящий размер частиц и любое подходящее распределение частиц по размерам. В конкретных предпочтительных вариантах осуществления, например, частицы заполнителя получают из материала с высоким содержанием карбоната кальция, такого как известняк (например, известковая мука). В некоторых материалах частицы заполнителя получают из одного или более материалов на основе  $\text{SiO}_2$  или силиката, таких как кварц, слюда, гранит и полевой шпат (например, измельченный кварц, измельченный слюда, измельченный гранит, измельченный полевой шпат).

В конкретных вариантах осуществления частицы заполнителя могут включать природные, синтетические и регенерированные материалы, такие как стекло, стекло вторичной обработки, угольный шлак, зольная пыль, материал с высоким содержанием карбоната кальция и материал с высоким содержанием карбоната магния.

В конкретных вариантах осуществления множество частиц заполнителя имеют средний размер частиц в диапазоне от приблизительно 5 мкм до приблизительно 7 мм (например, от приблизительно 5 мкм до приблизительно 5 мм, от приблизительно 5 мкм до приблизительно 4 мм, от приблизительно 5 мкм до приблизительно 3 мм, от приблизительно 5 мкм до приблизительно 2 мм, от приблизительно 5 мкм до приблизительно 1 мм, от приблизительно 5 мкм до приблизительно 500 мкм, от приблизительно 5 мкм до приблизительно 300 мкм, от приблизительно 20 мкм до приблизительно 5 мм, от приблизительно 20 мкм до приблизительно 4 мм, от приблизительно 20 мкм до приблизительно 3 мм, от приблизительно 20 мкм до приблизительно 2 мм, от приблизительно 20 мкм до приблизительно 1 мм, от приблизительно 20 мкм до приблизительно 500 мкм, от приблизительно 20 мкм до приблизительно 300 мкм, от приблизительно 100 мкм до приблизительно 5 мм, от приблизительно 100 мкм до приблизительно 4 мм, от приблизительно 100 мкм до приблизительно 3 мм, от приблизительно 100 мкм до приблизительно 2 мм, от приблизительно 100 мкм до приблизительно 1 мм).

Массовое отношение связующих элементов к частицам заполнителя может быть любым отношением, зависящим от предполагаемого применения продукта из композитного материала. Например, массовое отношение связующих элементов к частицам заполнителя может находиться в диапазоне приблизительно (50-99): приблизительно (1-50), например, приблизительно (60-99): приблизительно (1-40), приблизительно (80-99): приблизительно (1-20), приблизительно (90-99): приблизительно (1-10), приблизительно (50-90): приблизительно (10-50), приблизительно (50-70): приблизительно (30-50). В конкретных вариантах осуществления, в зависимости от области применения, массовое отношение связующих элементов к частицам заполнителя может находиться в диапазоне приблизительно (10-50): приблизительно (50-90), например, приблизительно (30-50): приблизительно (50-70), приблизительно (40-50): приблизительно (50-60).

В зависимости от материалов и условий, используемых для получения композитного материала, один или более типов связующих элементов могут быть более предпочтительными по сравнению с другими типами связующих элементов в связующей матрице композитного материала. Например, техноло-

гический процесс производства клинкера или цемента и используемое в нем сырье позволяют получать клинкерные или цементные микроструктуры, которые оказывают влияние на карбонизацию и получаемый композитный материал. Кроме того, измельчение клинкера может также влиять на размер частиц и распределение частиц по размерам и общую микроскопическую морфологию цемента, что может в свою очередь воздействовать на микроструктуры связующих элементов внутри композитного материала после карбонизации.

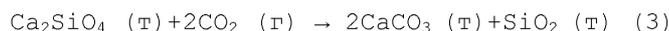
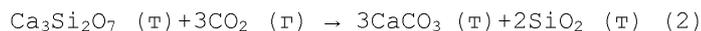
Дополнительным фактором, который оказывает влияние на образование связующей матрицы, является характеристика реакционной способности цемента, подвергаемого карбонизации. Например, цемент может характеризоваться суммарной площадью поверхности частиц, по меньшей мере 10% которой покрыта обладающей способностью к карбонизации фазой. В конкретных вариантах осуществления цемент может характеризоваться суммарной площадью поверхности частиц, по меньшей мере 20% которой покрыта обладающей способностью к карбонизации фазой. В конкретных вариантах осуществления цемент может характеризоваться суммарной площадью поверхности частиц, по меньшей мере 30% которой покрыта обладающей способностью к карбонизации фазой. В конкретных вариантах осуществления цемент может характеризоваться суммарной площадью поверхности частиц, по меньшей мере 40% которой покрыта обладающей способностью к карбонизации фазой. В конкретных вариантах осуществления цемент может характеризоваться суммарной площадью поверхности частиц, по меньшей мере 50% которой покрыта обладающей способностью к карбонизации фазой. В конкретных вариантах осуществления цемент может характеризоваться суммарной площадью поверхности частиц, по меньшей мере 60% которой покрыта обладающей способностью к карбонизации фазой. В конкретных вариантах осуществления цемент может характеризоваться суммарной площадью поверхности частиц, по меньшей мере 70% которой покрыта обладающей способностью к карбонизации фазой. В конкретных вариантах осуществления например, цемент может характеризоваться суммарной площадью поверхности частиц, по меньшей мере 80% которой покрыта обладающей способностью к карбонизации фазой. В конкретных вариантах осуществления цемент может характеризоваться суммарной площадью поверхности частиц, по меньшей мере 90% которой покрыта обладающей способностью к карбонизации фазой. В конкретных вариантах осуществления цемент может характеризоваться суммарной площадью поверхности частиц, по меньшей мере 95% которой покрыта обладающей способностью к карбонизации фазой. В конкретных вариантах осуществления порошковый материал характеризуется суммарной площадью поверхности частиц, которая практически полностью покрыта обладающей способностью к карбонизации фазой.

Используемый в изобретении термин "силикат кальция" или "композиция силиката кальция" обычно относится к природным минералам или синтетическим материалам, которые состоят из одной или более групп фаз силиката кальция, включающих CS (волластонит или псевдоволластонит, которые иногда изображают формулами  $\text{CaSiO}_3$  или  $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ),  $\text{C}_3\text{S}_2$  (ранкинит, который иногда изображают формулами  $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7$  или  $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2$ ),  $\text{C}_2\text{S}$  (белит,  $\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$  или ларнит,  $\text{Ca}_7\text{Mg}(\text{SiO}_4)_4$  или бредигит,  $\alpha\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$  или  $\gamma\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ , который иногда изображают формулами  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$  или  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ), аморфную фазу на основе силиката кальция, при этом каждый из этих материалов может включать один или более других ионов металлов и оксидов (например, оксидов алюминия, магния, железа или марганца) или их смеси, или может включать количество силиката магния в природной или синтетической форме (формах) в диапазоне от следовых количеств (1%) до приблизительно 50% или более по массе.

Регулирование процесса карбонизации и процесса отверждения

В этом изобретении дополнительно предлагаются способы получения новых композитных материалов, которые отверждаются преимущественно за счет реакции с  $\text{CO}_2$ . Помимо  $\text{CO}_2$ , еще одним реагентом, используемым в процессе, является вода. В предпочтительных вариантах осуществления изобретения  $\text{CO}_2$  используют в качестве реагирующего соединения, что приводит к секвестированию  $\text{CO}_2$  и образованию связующих элементов в получаемых композитных материалах. Карбонизация, например, может быть проведена с использованием  $\text{CO}_2$  и воды методом регулируемого гидротермического жидкофазного спекания (HLPS) для достижения прочности сцепления, которая позволяет удерживать вместе различные компоненты композитного материала. Обсуждение различных параметров осуществления метода HLPS можно найти в патентных документах U.S. Patent № 8114367, U.S. Pub. № US 2009/0143211 (Appl. Serial № 12/271566), U.S. Pub. № US 2011/0104469 (Appl. Serial № 12/984299), U.S. Pub. № 2009/0142578 (Appl. Serial № 12/271513), U.S. Pub. № 2013/0122267 (Appl. Serial № 13/411218), U.S. Pub. № 2012/0312194 (Appl. Serial № 13/491098), WO 2009/102360 (PCT/US2008/083606), WO 2011/053598 (PCT/US2010/054146), WO 2011/090967 (PCT/US2011/021623), U.S. Provisional Patent Application № 61/708423 filed October 1, 2012 и U.S. Patent Application Nos. 14/045,758, 14/045519, 14/045766, 14/045540, all filed October 3, 2013, U.S. Patent Application Nos. 14/207413, 14/207421, filed March 12, 2014, U.S. Patent Application Nos. 14/207920, 14/209238, filed March 13, 2014, U.S. Patent Application № 14/295601, 14/295402, filed June 4, 2014, содержание каждого из этих документов во всех отношениях включено в настоящее изобретение путем ссылки на них.

Предполагается, что при карбонизации силиката кальция протекают следующие реакции.



Обычно,  $\text{CO}_2$  вводят в форме газа, который растворен в инфильтрационной жидкости, такой как вода. Растворение  $\text{CO}_2$  приводит к образованию кислотных соединений углерода (таких как угольная кислота,  $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), в результате чего понижается pH в растворе. Слабокислый раствор инконгруэнтно растворяет соединения кальция в фазах силиката кальция. Кальций может выщелачиваться из кальцийсодержащих аморфных фаз по аналогичному механизму. Высвобождаемые катионы кальция и диссоциированные карбонатные соединения вызывают осаждение нерастворимых карбонатов. Предполагается, что обогащенные диоксидом кремния слои остаются на минеральных частицах в форме обедненных по кальцию слоев.

$\text{CaCO}_3$ , полученный в результате протекания описанных в изобретении этих или любых других реакций карбонизации с участием  $\text{CO}_2$ , может существовать в форме одного или более из различных полиморфов  $\text{CaCO}_3$  (например, в форме кальцита, арагонита и ватерита). Частицы  $\text{CaCO}_3$  находятся, в основном, в форме кальцита, но они могут также присутствовать в форме арагонита или ватерита или в виде комбинации двух или трех полиморфов (например, кальцит/арагонит, кальцит/ватерит, арагонит/ватерит или кальцит/арагонит/ватерит).

Может применяться  $\text{CO}_2$  с любой подходящей чистотой, в зависимости от требуемого результата карбонизации. Например, может быть использован технический сорт  $\text{CO}_2$  с чистотой около 99%, который производится многими промышленными газовыми компаниями, такими как Praxair, Inc., Linde AG, Air Liquide и другими. Производственные запасы  $\text{CO}_2$  могут храниться в больших резервуарах для хранения под давлением в форме жидкого диоксида углерода с регулированием температуры таким образом, чтобы поддерживать требуемое давление паров  $\text{CO}_2$ , например, приблизительно на уровне 2,07 МПа. Затем этот газ подают через газопровод в замкнутое пространство или камеру отверждения с помощью  $\text{CO}_2$  (для карбонизации). В самой простой системе,  $\text{CO}_2$  пропускают через замкнутое пространство с регулируемой скоростью, достаточной для вытеснения находящегося в замкнутом пространстве воздуха. Обычно время продувки может зависеть от размера замкнутого пространства и скорости, с которой подают  $\text{CO}_2$ . Во многих системах этот процесс продувки замкнутого пространства с целью вытеснения воздуха может быть осуществлен в течение времени, измеряемого минутами, с доведением концентрации  $\text{CO}_2$  до приемлемого уровня, после чего можно проводить отверждение. В простых системах газообразный  $\text{CO}_2$  затем вводят в систему при заданной скорости, которая позволяет поддерживать концентрацию  $\text{CO}_2$  на уровне, достаточном для проведения реакции отверждения.

Концентрации диоксида углерода могут непрерывно контролироваться и систематически поддерживаться. Концентрация  $\text{CO}_2$  может измеряться или постоянно контролироваться непосредственно в системе, например, методом недисперсионной инфракрасной спектроскопии (NDIR), и может быть использован контроллер, такой как программируемый логический контроллер (PLC) для регулирования концентрации  $\text{CO}_2$  до заданного значения, например, с помощью электронного/автоматического регулирующего клапана. При проведении измерений методом NDIR отбирают из системы пробу потока газа с помощью насоса с низкой производительностью. Перед отбором пробы для анализа методом NDIR используют холодильник для удаления влаги из газового потока. Измерение влажности газового потока в системе может быть проведено методом психрометрического анализа "сухой термометр - влажный термометр", используя устройство с сухим и влажным термометрами, или с помощью датчика влажности другого типа. Истинная концентрация  $\text{CO}_2$  может быть рассчитана с использованием компьютерной регулирующей системы или PLC. Сразу после определения истинной концентрации  $\text{CO}_2$ , в случае когда диоксид углерода был израсходован и его концентрация в этот момент времени стала меньше заданной величины, приводимый в действие регулирующей дозирование клапан может добавить в систему определенное количество осушенного  $\text{CO}_2$ . В различных вариантах осуществления, в случае необходимости, заданное значение можно изменять в зависимости от момента времени, исходя из опыта отверждения конкретных композиций, формы и размеров образцов композитных материалов.

На фиг. 3 приведен пример принципиальной схемы камеры отверждения, в которой обеспечивается увлажнение. Как показано на фиг. 3, подается вода и добавляется водяной пар в газообразную среду, которая циркулирует внутри камеры отверждения. Водой может служить любой подходящий источник питьевой воды. В некоторых вариантах осуществления используют обычную водопроводную воду. В некоторых вариантах осуществления вода может быть превращена в пар путем пропускания ее через аэрозольную форсунку или мелкокапельную распыливающую форсунку, электрический парогенератор, парогенератор с газовым подогревом или путем нагревания воды до температуры выше температуры газа в камере, для того чтобы вызвать испарение подаваемой жидкой воды, примером чего является барабанный реактор с подогревателем погружного типа. В еще одном варианте осуществления,  $\text{CO}_2$  может быть введен в систему после его барботирования через подаваемую нагретую воду для повышения относительной влажности вводимого потока газа, примером чего является барабанный реактор, сконфигурированный для работы в "проточном" режиме или в режиме "с незамкнутым циклом".

Относительная влажность является еще одним важным параметром, как в случае традиционного отверждения бетона, так и в случае отверждения композитного материала с помощью  $\text{CO}_2$ . В традиционной камере отверждения существует среда влажного воздуха, которая состоит в основном из азота, кислорода и паров воды. В этих системах относительную влажность чаще всего измеряют с помощью стандартного емкостного сенсора. Однако камеры отверждения с помощью  $\text{CO}_2$  имеют газовую среду, состоящую в основном из диоксида углерода, который не совместим с некоторыми типами этих сенсоров. В описанных в изобретении системах отверждения композитного материала с помощью  $\text{CO}_2$  могут быть применены такие сенсорные методы, как методы сухого и влажного термометров, в которых используются психрометрические отношения для диоксида углерода и паров воды, или приборы для измерения дипольной поляризации паров воды, или гигрометры с охлаждающим зеркалом, или емкостные сенсоры влажности.

В зависимости от типа и геометрии подвергаемого отверждению продукта, конструкции камеры и эффективности упаковки продукта в камере может потребоваться либо снижение, либо повышение влажности и ее регулирование до указанного заданного значения. Заданные значения могут представлять собой любое значение в диапазоне от 1 до 99% относительной влажности. Три различных метода регулирования влажности могут быть использованы в процессе отверждения композитного материала с помощью  $\text{CO}_2$ , которые могут быть объединены в одну единственную систему. Один метод увлажнения, в одном варианте осуществления системы отверждения с помощью  $\text{CO}_2$ , представлен на фиг. 3. Другой метод позволяет удалять влагу из системы для отверждения продуктов из композитного материала с помощью  $\text{CO}_2$ . Простым методом снижения относительной влажности является вытеснение влажного газа в системе с помощью осушенного газа, такого как диоксид углерода. В еще одном варианте осуществления можно уменьшать относительную влажность и, соответственно, удалять пары воды из газа методом без применения продувки, который в одном предпочтительном варианте осуществления представляет собой охлаждаемый теплообменник, в котором происходит извлечение воды.

На фиг. 4 приведен пример принципиальной схемы камеры отверждения, в которой применяется множество методов регулирования влажности, также же как в ней имеется возможность и регулирования, и восполнения  $\text{CO}_2$ , используя режим постоянного потока или регулирование давления, и в которой предусмотрена возможность регулирования температуры в соответствии с принципами изобретения. Эта система представляет собой пример системы, которая может обеспечивать регулирование с замкнутым контуром или регулирование с обратной связью, при котором обеспечиваются заданные величины рабочих параметров, таких как концентрация  $\text{CO}_2$ , влажность и температура, которые являются требуемыми значениями в указанные моменты времени технологического цикла, и в которой проводятся измерения с целью предоставления информации о том, совпадает ли фактическое значение регулируемого параметра с требуемым значением. Если обнаруживается отклонение от требуемого значения, осуществляется корректирующее воздействие с целью приведения значения параметра в соответствие с требуемым значением. Такие системы регулирования могут быть дорогими и сложными, и они могут применяться в случаях дорогостоящих продуктов или продуктов, которые требуют очень точного соблюдения технологических режимов.

Еще одним параметром регулирования является скорость газа и регулирование подачи материала, который подвергают в системе отверждению с помощью  $\text{CO}_2$ . Скорость газа может зависеть от переменных характеристик технологического оборудования, включающих, но этим не ограничивая, конструкцию камеры, конструкцию перегородки, размер вентилятора, скорость вращения/мощность вентилятора, количество вентиляторов, температурный градиент внутри системы, конструкцию полки внутри системы и размеры образца внутри системы. Самым простым методом регулирования скорости газа внутри камеры является корректировка скорости вращения газодувки (об/мин), обычно осуществляемая путем использования частотно-регулируемого привода, позволяющего регулировать скорость вращения электродвигателя газодувки. Газодувка может быть использована для циркуляции газа с требуемой скоростью в камере отверждения. Скорость газа в системе измеряют различными методами, включающими, но этим не ограничивая, измерения с помощью трубок Пито и лазерных доплеровских систем. Сигнал измерения скорости газа может быть послан обратно в компьютерную систему или программируемый логический контроллер и использован в качестве параметра регулирования процесса отверждения.

Регулирование температуры является еще одним важным параметром процесса карбонизации силиката кальция, в результате которого образуются требуемые связующие элементы и композитный материал по изобретению. Температура может быть измерена сенсором, таким как термопара или резистивный датчик температуры (RTD). Сигнал измерения может быть направлен обратно в контроллер или компьютер, которые могут регулировать энергию а теплообменнике и посредством этого корректировать температуру системы в целом в течение времени. Газодувка является важным компонентом нагревательной системы, так как она способствует передачи тепловой энергии газу, который переносит эту тепловую энергию к продуктам в саму камеру, что играет важную роль при регулировании влажности образцов. Нагревание может осуществляться электрическим методом или в результате сжигания газа. Могут использоваться нагреватели с рубашкой для регулирования температуры  $\text{CO}_2$ , который пропускают через камеру при контакте с нагревателем с рубашкой, и в этом случае может быть применен любой подходя-

щий источник тепла. Методы наружного обогрева могут включать, но этим не ограничивая, электронагрев, водяной нагрев или нагрев горячим маслом. В настоящее время для камер отверждения с помощью  $\text{CO}_2$  используют системы с косвенным газовым подогревом, а непосредственный подогрев с помощью газовых горелок не применяют, так как это приводит к попаданию воздуха и продуктов сгорания в систему, что вызывает разбавление  $\text{CO}_2$  и осложняет осуществление регулирования концентрации  $\text{CO}_2$ . В некоторых системах с более низкой производительностью, таких как барабанные реакторы, используют нагреватели с рубашкой с электроподогревом для нагревания всей поверхности камеры, а не нагревающий элемент внутри камеры.

Способ получения композитного материала и связующих элементов по изобретению может быть сконфигурирован так, чтобы он позволял достигать конкретно заданных рабочих характеристик карбонизированных продуктов. Обычно такой способ включает: смешение порошкообразной композиции (цемента) и жидкой композиции с получением суспензионной смеси; формование суспензионной смеси в требуемую форму, либо путем заливки суспензии в форму, прессования суспензии в форме, прессования суспензии в виброформе, экструзии суспензии, формования суспензии в скользящей опалубке, либо путем использования любого другого метода формования, обычно применяемого в производстве бетонных изделий, и отверждение сформованной суспензионной смеси при температуре в диапазоне от приблизительно  $20^\circ\text{C}$  до приблизительно  $150^\circ\text{C}$  в течение от приблизительно 1 ч до приблизительно 80 ч в атмосфере пара, включающего воду и  $\text{CO}_2$  и имеющего давления в диапазоне от приблизительно атмосферного давления окружающей среды до приблизительно давления 0,34 МПа выше атмосферного давления окружающей среды и имеющего концентрацию  $\text{CO}_2$  от приблизительно 10% до приблизительно 90%, с получением композитного материала. Таким образом, отверждение сформованной суспензионной смеси может быть успешно осуществлено при температуре в диапазоне от приблизительно  $20^\circ\text{C}$  до приблизительно  $150^\circ\text{C}$ . Отверждение может быть проведено в течение от приблизительно 1 ч до приблизительно 80 ч. Давление, при котором происходит отверждение, может составлять от приблизительно атмосферного давления окружающей среды до приблизительно давления 0,34 МПа атмосферного давления окружающей среды. Концентрация  $\text{CO}_2$  может находиться в диапазоне от приблизительно 10% до приблизительно 90%.

Время, требующееся для отверждения композитного материала, определяется способностью паров воды и газообразного  $\text{CO}_2$  диффундировать через этот объект. Обычно объекты с большей толщиной требуют большего времени для отверждения, чем объекты с меньшей толщиной. Аналогично, объекты с высокой плотностью (и меньшими пространствами с открытыми порами) требуют большего времени для отверждения, чем объекты с низкой плотностью (и большими пространствами с открытыми порами). В приведенной далее таблице приведены примеры того, как время отверждения может изменяться в зависимости от наименьшей толщины (или толщины стенки, или толщины секции) в трех измерениях и насыпной плотности получаемого объекта.

Могут быть получены превосходные свойства и рабочие характеристики изделий для специальных областей применения. В конкретных вариантах осуществления композитный материал характеризуется прочностью при сжатии от приблизительно 20 МПа до приблизительно 175 МПа (например, от приблизительно 20 МПа до приблизительно 150 МПа, от приблизительно 20 МПа до приблизительно 120 МПа, от приблизительно 20 МПа до приблизительно 100 МПа, от приблизительно 20 МПа до приблизительно 80 МПа, от приблизительно 20 МПа до приблизительно 65 МПа, от приблизительно 30 МПа до приблизительно 120 МПа, от приблизительно 30 МПа до приблизительно 100 МПа, от приблизительно 30 МПа до приблизительно 65 МПа, от приблизительно 60 МПа до приблизительно 120 МПа, от приблизительно 90 МПа до приблизительно 130 МПа, от приблизительно 100 МПа до приблизительно 175 МПа, от приблизительно 120 МПа до приблизительно 175 МПа, от приблизительно 140 МПа до приблизительно 175 МПа, от приблизительно 150 МПа до приблизительно 175 МПа).

В конкретных вариантах осуществления композитный материал характеризуется пределом прочностью при изгибе от приблизительно 3 МПа до приблизительно 30 МПа (например, от приблизительно 3 МПа до приблизительно 25 МПа, от приблизительно 3 МПа до приблизительно 20 МПа, от приблизительно 3 МПа до приблизительно 15 МПа, от приблизительно 3 МПа до приблизительно 10 МПа, от приблизительно 10 МПа до приблизительно 30 МПа, от приблизительно 20 МПа до приблизительно 30 МПа, от приблизительно 5 МПа до приблизительно 20 МПа).

В конкретных вариантах осуществления композитный материал характеризуется поглощением воды меньшим чем приблизительно 10%. В еще одних материалах осуществления, композитный материал характеризуется поглощением воды меньшим чем приблизительно 8%. В еще одних материалах осуществления, композитный материал характеризуется поглощением воды меньшим чем приблизительно 5%. В еще одних материалах осуществления композитный материал характеризуется поглощением воды меньшим чем приблизительно 4%. В еще одних материалах осуществления композитный материал характеризуется поглощением воды меньшим чем приблизительно 3%. В еще одних материалах осуществления композитный материал характеризуется поглощением воды меньшим чем приблизительно 2%. В еще одних материалах осуществления композитный материал характеризуется поглощением воды меньшим чем приблизительно 1%.

Композитный материал может иметь одну или более из требуемых текстур, узоров и физических свойств, в частности такие, которые характерны для природного камня. В конкретных предпочтительных вариантах осуществления композитный материал имеет визуальную структуру, аналогичную природному камню. Другие характеристики включают цвета (например, черный, белый, голубой, розовый, серый (от бледно-серого до темно-серого), зеленый, красный, желтый, коричневый, бирюзовый (голубовато-зеленый) или пурпурный) и текстуры.

#### **Продукты из композитных материалов и области их применения**

Описанные в изобретении композитный материал и связующие элементы в силу их превосходных свойств, которые могут быть при необходимости скорректированы, как описано в изобретении, могут иметь разнообразное применение, например, в объектах инфраструктуры, сооружениях, дорожных покрытиях, ландшафтной архитектуре, системах накопления и хранения энергии, в производстве электроэнергии, в сельском хозяйстве, в автомобильной промышленности, производстве абразивных материалов и режущих инструментов и так далее.

Описанные в изобретении композитный материал и связующие элементы могут применяться во многих случаях, при которых используют портландцемент, известковый цемент или относящиеся к ним минеральные вяжущие материалы. Композитный материал по изобретению может применяться в любых случаях, при которых используют традиционный конструкционный или качественный бетон, например в плотинах, мостах, плавательных бассейнах, домах, улицах, террасах, фундаментах, балюстрадах, плитках из чистого клинкерного цемента, мозаичных плитках, брусках для мощения улиц, фонарных столбах, канализационных люках или в их комбинациях.

Для модификации и корректировки внешнего вида и/или механических свойств получаемого композитного материала могут быть использованы различные добавки, такие как добавки, выбранные из одного или более пигментов, цветного стекла и/или цветного кварца. Могут быть также использованы добавки, позволяющие уменьшать потребление воды и изменять реологию.

В конкретных вариантах осуществления композит дополнительно включает пигмент. Пигмент может быть равномерно диспергирован или практически неравномерно диспергирован в связывающих матрицах, в зависимости от того, какой требуется получить композитный материал. Пигмент может представлять собой любой подходящий пигмент, в том числе, например, оксиды различных металлов (например, оксид железа, оксид кобальта, оксид хрома). Пигмент может быть любого цвета или любых цветов, например, выбранных из черного, белого, голубого, серого, розового, зеленого, красного, желтого или коричневого цветов. Пигмент может присутствовать в любом подходящем количестве, в зависимости от того, какой требуется получить композитный материал, например в количестве в диапазоне от приблизительно 0,0% до приблизительно 10% по массе (например, от приблизительно 0,0% до приблизительно 8%, от приблизительно 0,0% до приблизительно 6%, от приблизительно 0,0% до приблизительно 5%, от приблизительно 0,0% до приблизительно 4%, от приблизительно 0,0% до приблизительно 3%, от приблизительно 0,0% до приблизительно 2%, от приблизительно 0,0% до приблизительно 1%, от приблизительно 0,0% до приблизительно 0,5%, от приблизительно 0,0% до приблизительно 0,3%, от приблизительно 0,0% до приблизительно 0,2%, от приблизительно 0,0% до приблизительно 0,1%).

В конкретных вариантах осуществления связующий элемент/матрицу смешивают с волокнами, песком, заполнителями и/или другими добавками, такими как пеногасители, и/или ультрадисперсными частицами, такими как высокодисперсный диоксид кремния и  $\text{CaCO}_3$ , с целью получения армированного стекловолокном бетона (FRC), который обладает эксплуатационными характеристиками, аналогичными характеристикам армированных волоками композитов и/или сверхвысокопрочного фибробетона (UHPC). Эти твердые вещества могут применяться в тех же случаях, при которых их применяют в традиционном армированном стекловолокном бетоне (FRC) и/или в сверхвысокопрочном фибробетоне (UHPC). В альтернативном варианте осуществления путем регулирования текучести (например, путем оптимизации содержания воды в процессе производства) могут быть получены другие типы продуктов из бетона. Продукты включают торкретбетон, самоуплотняющиеся бетоны, уплотненные катком бетоны или их комбинации.

В другом варианте осуществления связующий элемент/матрицу смешивают с металлом, таким как алюминий, и  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и подвергают автоклавной обработке, или при регулировании пористости, используя различные вспомогательные технологические приемы, такие как вакуум или вовлечение воздуха, получают материал, который имитирует/напоминает автоклавный аэрированный бетон (AAC). Этот материал может применяться для тех же целей, что и традиционный автоклавный аэрированный бетон AAC.

В конкретных вариантах осуществления связующий элемент/матрицу смешивают с песком и/или с заполнителями с низкой плотностью (например, с плотностью  $< 2,0 \text{ г/см}^3$ , например, с вспученным вермикулитом или перлитом, пемзой, вспученным шлаком, вспученным глинистым сланцем или их комбинациями), и при регулировании пористости эти композиты могут применяться в качестве легких бетонов или ячеистого бетона, аэрированного легкого бетона, бетона с переменной плотностью, вспененного бетона или сверхлегких бетонов или любого другого материала, относящегося к этим типам бетонов. В другом варианте осуществления связующий элемент/матрицу смешивают с заполнителями с высокой

плотностью (например, с плотностью  $>3,2 \text{ г/см}^3$ ), и полученный продукт может представлять собой тяжелый бетон.

Описанные в изобретении связующий элемент/матрица могут быть использованы в комбинации (и таким образом армированы) со сталью или другими металлическими армирующими материалами с получением продуктов из армированного бетона, которые могут применяться для тех же целей, что и традиционные бетонные структуры. Материал может быть подвергнут предварительному напряжению с получением материала, который имитирует/напоминает предварительно напряженный бетон. В конкретных вариантах осуществления связующий элемент/матрица могут быть залиты в громадные формы с получением материала, который имитирует/напоминает монолитный бетон. Такие типы монолитного бетона могут применяться при сооружении гравитационной плотины, крупных оградительных сооружений или того и другого. Бетон, полученный из описанных в изобретении связующего элемента и связующей матрицы, может также быть изготовлен с различными текстурами для декоративных или функциональных целей.

В некоторых вариантах осуществления композитный материал по изобретению может быть получен таким образом, что он будет обладать отличной устойчивостью к коррозии, обеспечивающей защиту стальной арматуры в среде с высоким содержанием хлорида и высокий срок службы в агрессивных сульфатных средах. Композитный материал может применяться в узкоспециализированных областях, таких как экранирование звука и/или защита от радиоактивного излучения. В одном варианте осуществления, материал может иметь требуемую огнестойкость и может применяться для производства огнеупорных продуктов. Материал может также выдерживать экстремальные погодные условия, такие как, например, условия замерзания, высокие температуры в пустынях или экстремальные колебания погоды, и/или обладать стойкостью к резким перепадам температур. Материал может быть также пригоден для специального использования в морской воде, в условиях низких температур и/или в устойчивых к взрыву сооружениях. В некоторых вариантах осуществления материал может быть использован в сейсмостойких сооружениях и/или в сооружениях геосинтетического типа.

Связующие элементы по изобретению могут быть смешаны с добавками, включающими  $\text{CaCO}_3$  или гипс и песок, с образованием монолитных твердых веществ. Связующие элементы по изобретению могут быть также смешаны с песком или другими минералами с получением строительного раствора или цементного теста, и полученный материал может применяться для таких же целей, для которых применяют традиционный строительный раствор и цементное тесто. Связующие элементы по изобретению могут быть смешаны с металлическими или органическими или керамическими волокнами с получением цемента с упрочняющим волоконным наполнителем. Полученный материал может применяться для таких же целей, для которых применяют традиционные цементы с упрочняющим волоконным наполнителем.

Для получения композитных материалов из обладающей способностью к карбонизации композиции по изобретению могут быть использованы любые подходящие заполнители, например материалы, содержащие оксид кальция или диоксид кремния. Примеры заполнителей включают инертные материалы, такие как темный диабаз, строительный песок, мелкий гравий. В конкретных предпочтительных вариантах осуществления в качестве заполнителей могут быть также использованы легкие заполнители, такие как перлит или вермикулит. В качестве тонкодисперсных заполнителей могут быть также использованы такие материалы, как твердые промышленные отходы (например, зольная пыль, шлак, тонкая кремнеземная пыль).

Множество заполнителей могут иметь любой подходящий средний размер частиц и любое подходящее распределение частиц по размерам. В конкретных вариантах осуществления множество заполнителей имеет средний размер частиц в диапазоне от приблизительно 0,25 мм до приблизительно 25 мм (например, от приблизительно 5 мм до приблизительно 20 мм, от приблизительно 5 мм до приблизительно 18 мм, от приблизительно 5 мм до приблизительно 15 мм, от приблизительно 5 мм до приблизительно 12 мм, от приблизительно 7 мм до приблизительно 20 мм, от приблизительно 10 мм до приблизительно 20 мм, приблизительно 3,18 мм, приблизительно 6,35 мм, приблизительно 9,52 мм, приблизительно 12,70 мм, приблизительно 19,05 мм).

В композитный материал могут быть также введены химические добавки, например пластифицирующие добавки, суперпластифицирующие добавки, замедлители схватывания, ускорители схватывания, диспергирующие вещества и другие модифицирующие реологию вещества. Могут быть также введены некоторые производимые промышленностью химические добавки, такие как Glenium™ 7500 фирмы BASF Chemicals и Acumer™ фирмы Dow Chemical Company. В конкретных вариантах осуществления, один или более пигментов могут быть равномерно диспергированы или практически неравномерно диспергированы в связующих матрицах, в зависимости от того, какой требуется композитный материал. Пигментом может быть любой подходящий пигмент, в том числе, например, оксиды различных металлов (например, черный железистый оксидный пигмент, оксид кобальта и оксид хрома). Пигмент может быть любого цвета или любых цветов, например, выбранных из черного, белого, голубого, серого, розового, зеленого, красного, желтого и коричневого цветов. Пигмент может присутствовать в любом подходящем количестве, в зависимости от того, какой требуется композитный материал, например, в количестве в диа-

пазоне от приблизительно 0,0% до приблизительно 10% по массе.

Следует иметь в виду, что раскрытые в изобретении композиции силиката кальция, фазы и способы могут быть адаптированы под использование фаз силикатов магния вместо или в дополнение к фазам силиката кальция. Используемый в изобретении термин "силикат магния" относится к природным минералам или синтетическим материалам, которые состоят из одной или более групп соединений, содержащих магний и кремний, включающих, например,  $Mg_2SiO_4$  (известный также как "форстерит") и  $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$  (известный также как "талк"), причем материал может включать один или более ионов или оксидов других металлов (например, оксиды кальция, алюминия, железа или марганца) или их смеси или может включать количество силиката кальция в природной или синтетической форме (формах) в диапазоне от следовых количеств (1%) до приблизительно 50% или более по массе.

### Примеры

Образцы цемента обладающего способностью к карбонизации силиката кальция заделывали в эпоксидную смолу, полировали и покрывали слоем графита для получения информации по распределению фаз внутри индивидуальных частиц. Образцы анализировали методом сканирующей электронной микроскопии (SEM) в режиме визуализации спектра обратно-рассеянных электронов (BSE). Контрастность каждой фазы зависит от ее стехиометрии, при этом более плотные фазы, содержащие элементы с более высоким значением среднего атомного номера, будут проявляться на изображении более ярко, чем менее плотные фазы с более низким значением среднего атомного номера. Контрастность различных фаз может быть соотнесена путем сравнения коэффициента контрастности  $\eta$  изображения в обратно-рассеянных электронах (BSE), рассчитанного с использованием среднего атомного номера  $\bar{Z}$  каждой фазы.

$$\eta = \frac{\ln \bar{Z}}{6} - \frac{1}{4} (\bar{Z} \geq 10) \quad (\text{Уравнение 1})$$

Средний атомный номер  $\bar{Z}$  каждой фазы представляет собой сумму атомных масс каждого атома, присутствующего в фазе, деленную на суммарное число атомов, где N представляет собой число каждого элемента с атомным номером A и атомной массой Z (ZNA представляет собой молекулярную массу).

$$\bar{Z} = \frac{\sum NAZ}{\sum NA} \quad (\text{Уравнение 2})$$

Значения  $\eta$  для фаз, присутствующих в частицах цемента, приведены в табл. 1. Аморфные фазы имеют переменный химический состав, не определяемый дифракционными методами. Для большинства цементов аморфная фаза будет иметь состав, аналогичный составу фазы мелилита. В цементах с более низким содержанием  $Al_2O_3$  и MgO аморфная фаза будет иметь более высокое значение среднего атомного номера и, следовательно, будет характеризоваться более высокой яркостью на изображениях, полученных с помощью обратно-рассеянных электронов (BSE). Идентичность фаз подтверждается измерением индивидуальных фаз с помощью рентгеновского микрозонда.

Таблица 1. Рассчитанные значения коэффициента контрастности для изображений в обратно-рассеянных электронах для фаз, присутствующих в частицах цемента из обладающего способностью к карбонизации силиката кальция<sup>a</sup>.

Фаза	$\eta$
SiO <sub>2</sub>	0,127
CaCO <sub>3</sub>	0,148
Al - Мелилит (Ca <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> SiO <sub>7</sub> )	0,154
Mg - Мелилит (Ca <sub>2</sub> MgSi <sub>2</sub> O <sub>7</sub> )	0,154
Волластонит (CaSiO <sub>3</sub> )	0,160
Ранкинит (Ca <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> )	0,166
Белит (Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> )	0,171

<sup>a)</sup> Самое высокое значение будут соответствовать фазе с самой высокой яркостью. Фазы силиката кальция имеют самую высокую контрастность на изображениях в обратно-рассеянных электронах (BSE) и будут представлять собой фазы с самой высокой яркостью на изображениях в обратно-рассеянных электронах (BSE). Самые темные области на изображении соответствуют порам или пустотам, заполненным установочной смолой на основе углерода.

Были приготовлены экспериментальные цементы тремя различными методами с отличающимися конечными химическими составами. Экспериментальный цемент 1 приготавливали из известняка и песка, измельченных до тонкости помола 85%, проходящих через сито размером 200 меш. Известняк и песок смешивали с получением суммарного атомного отношения кальция к кремнию приблизительно 1. Измельченное и смешанное сырье подвергали обработке во вращающейся обжиговой печи при макси-

мальной температуре приблизительно 1200°C и времени пребывания от 30 до 60 мин с целью взаимодействия порошка и получения зерен цементного клинкера из спеченного обладающего способностью к карбонизации силиката кальция, в основном состоящих из обладающих способностью к карбонизации силикатов кальция, меллилитов, аморфной фазы с составом, подобным мелилиту, и непрореагировавшего диоксида кремния. Содержание оксидов в этом цементе, определенное рентгенофлуоресцентным методом (XRF), приведено в табл. 2. Фазовый состав этого цемента, определенный методом рентгеноструктурного анализа (XRD), приведен в табл. 3. Затем цементный клинкер измельчали, используя двухкамерную шаровую мельницу с замкнутым циклом. Для получения измельченного цемента со средним диаметром частиц 12 мкм регулировали скорость подачи материала, скорость вращения шаровой мельницы и расход воздуха в пневмосепараторе. На фиг. 5 представлен спрессованный материал из прореагировавших частиц, полученных при использовании этого цемента и подвергнутых воздействию атмосферы с содержанием >95% CO<sub>2</sub> при 60°C в течение 18 ч.

Экспериментальный цемент 1 подробно исследовали методом сканирующей электронной микроскопии (SEM) в режиме обратно-рассеянных электронов (BSE) в сочетании с анализом с помощью рентгеновского микронзонда. Элементный состав, определенный с помощью рентгеновского микронзонда, сопоставляли с фазами, идентифицированными методом рентгеноструктурного анализа (XRD). Атомный состав фаз, определенный с помощью рентгеновского микронзонда, приведен в табл. 4. Этот анализ позволил идентифицировать дополнительную фазу, браунмиллерит или Ca<sub>2</sub>(Al, Fe)<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, а также две четко выраженные частично реакционноспособные аморфные фазы: аморфную фазу с низким содержанием Al, фазу 1, и аморфную фазу с высоким содержанием Al, фазу 2. На фиг. 6, 7 и 8 данные по анализу составов, собранные в сочетании с контрастностью фаз, наблюдаемых на изображениях, полученных режиме обратно-рассеянных электронов (BSE), использовали для создания в условных цветах карт непрореагировавших частиц. Обнаруживается множество примеров многофазных частиц различных классификаций.

Таблица 2. Содержание оксидов в экспериментальном цементе 1, определенное рентгенофлуоресцентным методом (XRF).

SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
44,9%	43,8%	5,3%	1,8%	1,2%	0,3%	2,0%	0,4%	0,2%	0,1%	0,0%

Таблица 3. Фазовый состав экспериментального цемента 1, определенный методом рентгеноструктурного анализа (XRD).

Волластонит CaSiO <sub>3</sub>	Ранкинит Ca <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	Белит Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	Аморфная фаза переменного состава	Диоксид кремния SiO <sub>2</sub>	Известь CaO	Мелилиты переменного состава
15%	19%	14%	30%	5%	1%	16%

Таблица 4. Атомный состав фаз в экспериментальном цементе 1, определенный с помощью рентгеновского микрозонда (выраженный в атомных %).

фаза	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Mn	Fe
Волластонит/ псевдоволластонит	59,5	0,0	0,0	0,6	18,7	0,0	0,3	20,8	0,1	0,0	0,1
Ранкинит	58,0	0,0	0,2	0,4	15,8	0,0	0,1	25,5	0,0	0,0	0,0
Белит	56,8	0,0	0,1	0,6	13,3	0,0	0,2	28,8	0,0	0,0	0,1
Аморфная (1)	62,2	0,7	0,8	0,7	36,1	0,0	4,2	4,7	0,1	0,0	0,4
Аморфная (2)	60,0	0,8	0,4	9,3	18,8	0,0	6,3	4,1	0,0	0,0	0,1
Браунмиллерит	55,9	0,0	0,7	7,0	3,3	0,4	0,3	23,9	0,4	0,1	8,0
Мелилит	58,3	0,4	2,1	8,8	12,1	0,0	0,3	17,2	0,0	0,0	0,8
Диоксид кремния	66,6	0,0	0,0	0,3	33,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Известь	50,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	50,0	0,0	0,0	0,0

В случае экспериментального цемента 2 известняк высокой чистоты и песок измельчали и смешивали с получением суммарного атомного отношения кальция к кремнию приблизительно 1. Измельченное и смешанное сырье гранулировали путем перемешивания с водой и загружали в огнеупорные емкости. Емкости и гранулированное сырье обжигали при 1500°C в электрической печи с получением цементного клинкера из спеченного обладающего способностью к карбонизации силиката кальция, в основном состоящего из реакционноспособных силикатов кальция, аморфной фазы с составом, подобным волластониту, и непрореагировавшего диоксида кремния. Содержание оксидов в этом цементе, определенное рентгенофлуоресцентным методом (XRF), приведено в табл. 5. Фазовый состав этого цемента приведен в табл. 6. Полученное сырье измельчали с помощью струйной мельницы. Для получения частиц со средним размером 12 мкм регулировали скорость подачи материала, геометрические размеры мельницы и давление воздуха. Спрессованный материал из измельченного цемента подвергали воздействию атмосферы с содержанием >95% CO<sub>2</sub> при 60°C в течение 18 ч. На фиг. 9 и фиг. 10 показаны прореагировавшие однофазные и многофазные частицы.

Таблица 5. Содержание оксидов в экспериментальном цементе 2, определенное рентгенофлуоресцентным методом (XRF).

SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
45,8 %	51,1 %	1,8%	0,4%	0,6%	0,3%	0,3%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Таблица 6. Фазовый состав экспериментального цемента 2, определенный методом рентгеноструктурного анализа (XRD).

Волластонит CaSiO <sub>3</sub>	Ранкинит Ca <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	Белит Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	Аморфная фаза переменного состава	Диоксид кремния SiO <sub>2</sub>	Известь CaO	Мелилиты переменного состава
20%	0%	11%	68%	1%	0%	0%

Получали обладающий способностью к карбонизации силикат кальция (экспериментальный цемент 3). Для получения цемента известняк и песок измельчали до тонкости помола 85%, проходящие через сито размером 200 меш. Известняк и песок смешивали с получением суммарного атомного отношения кальция к кремнию приблизительно 1. Измельченное и смешанное сырье подвергали обработке во вращающейся обжиговой печи при максимальной температуре приблизительно 1260°C и времени пребывания от 30 до 60 мин с целью взаимодействия порошка и получения зерен цементного клинкера из спеченного обладающего способностью к карбонизации силиката кальция, в основном состоящих из обла-

дающих способностью к карбонизации силикатов кальция, мелилитов, аморфной фазы с составом, подобным мелилиту, и непрореагировавшего диоксида кремния. Содержание оксидов в этом цементе, определенное рентгенофлуоресцентным методом (XRF), приведено в табл. 7. Фазовый состав этого цемента, определенный методом рентгеноструктурного анализа (XRD), приведен в табл. 8. Затем цементный клинкер измельчали, используя двухкамерную шаровую мельницу с замкнутым циклом. Для получения измельченного цемента со средним диаметром частиц 12 мкм, регулировали скорость подачи материала, скорость вращения шаровой мельницы и расход воздуха в пневмосепараторе. На фиг. 11 и фиг. 12 представлены спрессованные материалы из прореагировавших частиц, полученных при использовании этого цемента и подвергнутых воздействию атмосферы с содержанием >95% CO<sub>2</sub> при 60°C в течение 18 ч.

Таблица 7. Содержание оксидов в экспериментальном цементе 3, определенное рентгенофлуоресцентным методом (XRF).

SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
43,8	42,9	6,0%	2,5%	2,0%	1,0%	1,1%	0,1%	0,3%	0,2%	0,1%
%	%									

Таблица 8. Фазовый состав экспериментального цемента 3, определенный методом рентгеноструктурного анализа (XRD).

Волластонит CaSiO <sub>3</sub>	Ранкинит Ca <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	Белит Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	Аморфная фаза переменного состава	Диоксид кремния SiO <sub>2</sub>	Известь CaO	Мелилиты переменного состава
23%	18%	1%	23%	5%	0%	30%

В описании этого изобретения и в прилагаемых пунктах формулы изобретения, формы единственного числа включают ссылку и на формы множественного числа, если из контекста не следует иное.

Если не указано иначе, то все используемые в изобретении технические и научные термины имеют значения, которые являются общепринятыми для обычного специалиста в данной области. В изобретении описаны предпочтительные способы и материалы, но при реализации или испытании настоящего изобретения также могут быть использованы любые способы и материалы, аналогичные или эквивалентные способам и материалам, описанным в изобретении. Указанные в изобретении способы могут быть осуществлены в любом порядке, который логически возможен, помимо конкретно указанного в изобретении порядка.

Включение содержания документа в изобретение путем ссылки на него

В описании этого изобретения были сделаны ссылки и приведено цитирование других документов, таких как патенты, патентные заявки, патентные публикации, журналы, книги, газеты, содержимое сайтов в интернете. Содержание всех таких документов для всех случаев включено в изобретение путем ссылки на них. Любая информация или ее часть, по поводу которой указано, что она включена в изобретение путем ссылки на нее, но которая противоречит однозначно изложенным в изобретении определениям, утверждениям или другой раскрываемой информации, включается в изобретение только в том объеме, при котором не возникает противоречий между этой включенной информацией и информацией, раскрытой в настоящем изобретении. В случае возникновения противоречия противоречие должно разрешаться в пользу настоящего изобретения.

#### Эквиваленты

Предполагается, что описанные в изобретении типичные примеры приводятся только с целью иллюстрации изобретения и их не следует никоим образом истолковывать в качестве ограничения объема изобретения. Более того, для специалистов в данной области после ознакомления с полным содержанием изобретения, в том числе с приведенными в изобретении примерами и ссылками на научные и патентные публикации, станет очевидным возможность создания модификаций изобретения и многих дополнительных вариантов его осуществления, помимо тех, которые продемонстрированы и описаны в изобретении. Эти примеры содержат важную дополнительную информацию, пояснения и указания, которые могут быть использованы при реализации настоящего изобретения на практике в его различных вариантах осуществления и эквивалентах.

#### ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Композитный материал, получаемый карбонизацией силиката кальция с помощью CO<sub>2</sub>, включающий множество связующих элементов и один или более материалов заполнителей, при этом указанные связующие элементы представляют собой элементы одного или более типов, выбранных из:

связующего элемента, включающего ядро из диоксида кремния, образовавшегося в результате карбонизации обладающей способностью к карбонизации фазы силиката кальция, полностью или частично окруженное обогащенным диоксидом кремния корковым слоем различной толщины, который полностью или частично заключен в оболочку из частиц CaCO<sub>3</sub>;

связующего элемента, включающего ядро из диоксида кремния, образовавшегося в результате карбонизации обладающей способностью к карбонизации фазы силиката кальция, полностью или частично заключенное в оболочку из частиц  $\text{CaCO}_3$ ;

связующего элемента, включающего ядро не обладающей способностью к карбонизации фазы, полностью или частично заключенное в оболочку из частиц  $\text{CaCO}_3$ ;

связующего элемента, включающего многофазное ядро, состоящее из диоксида кремния, образовавшегося в результате карбонизации обладающей способностью к карбонизации фазы силиката кальция, и частично прореагировавшего силиката кальция, где многофазное ядро полностью или частично окружено обогащенным диоксидом кремния корковым слоем различной толщины, который полностью или частично заключен в оболочку из частиц  $\text{CaCO}_3$ ;

связующего элемента, включающего многофазное ядро, состоящее из не обладающей способностью к карбонизации фазы и частично прореагировавшего силиката кальция, где многофазное ядро полностью или частично окружено обогащенным диоксидом кремния корковым слоем различной толщины, который полностью или частично заключен в оболочку из частиц  $\text{CaCO}_3$ ;

связующего элемента, включающего частицы частично прореагировавшего силиката кальция без четко выраженного ядра и корковый слой из диоксида кремния, заключенный в оболочку из частиц  $\text{CaCO}_3$ ; и

связующего элемента, включающего пористые частицы без четко выраженного коркового слоя диоксида кремния, заключенные в оболочку из частиц  $\text{CaCO}_3$ ,

где множество связующих элементов образуют сопряженную связующую матрицу, обеспечивающую прочность сцепления и удерживающую композитный материал.

2. Композитный материал по п.1, где не обладающую способностью к карбонизации фазу выбирают из диоксида кремния и мелилита.

3. Композитный материал по п.1 или 2, где фазу силиката кальция выбирают из волластонита, псевдоволластонита, ранкинита, белита и обладающих способностью к карбонизации аморфных силикатов кальция или комбинации двух или более из них.

4. Композитный материал по любому из пп.1-3, дополнительно включающий одну или более пустот, расположенных в пространстве между связующими элементами, при этом необязательно один или более связующих элементов включают одну или более пустот.

5. Композитный материал по любому из пп.1-4, где обогащенный диоксидом кремния корковый слой имеет толщину в диапазоне от приблизительно 0,01 мкм до приблизительно 50 мкм.

6. Композитный материал по любому из пп.1-5, где обогащенный диоксидом кремния корковый слой характеризуется содержанием диоксида кремния в диапазоне от приблизительно 50% до приблизительно 90% по объему и содержанием  $\text{CaCO}_3$  в диапазоне от приблизительно 10% до приблизительно 50% по объему.

7. Композитный материал по любому из пп.1-6, в котором упомянутые один или более материалов заполнителей необязательно равномерно распределены в связующей матрице.

8. Композитный материал по любому из пп.1-7, дополнительно включающий один или более дополнительных материалов, выбранных из зольной пыли, шлака и тонкой кремнеземной пыли, необязательно равномерно распределенных в связующей матрице.

9. Связующая матрица, включающая множество связующих элементов, где связующие элементы выбирают из:

связующего элемента, включающего ядро из диоксида кремния, образовавшегося в результате карбонизации обладающей способностью к карбонизации фазы силиката кальция, полностью или частично окруженное обогащенным диоксидом кремния корковым слоем различной толщины, который полностью или частично заключен в оболочку из частиц  $\text{CaCO}_3$ ;

связующего элемента, включающего ядро из диоксида кремния, образовавшегося в результате карбонизации обладающей способностью к карбонизации фазы силиката кальция, и полностью или частично заключенное в оболочку из частиц  $\text{CaCO}_3$ ;

связующего элемента, включающего ядро не обладающей способностью к карбонизации фазы, полностью или частично заключенное в оболочку из частиц  $\text{CaCO}_3$ ;

связующего элемента, включающего многофазное ядро, состоящее из диоксида кремния, образовавшегося в результате карбонизации обладающей способностью к карбонизации фазы силиката кальция, и частично прореагировавшего силиката кальция, где многофазное ядро полностью или частично окружено обогащенным диоксидом кремния корковым слоем различной толщины, который полностью или частично заключен в оболочку из частиц  $\text{CaCO}_3$ ;

связующего элемента, включающего многофазное ядро, состоящее из не обладающей способностью к карбонизации фазы и частично прореагировавшего силиката кальция, где многофазное ядро полностью или частично окружено обогащенным диоксидом кремния корковым слоем различной толщины, который полностью или частично заключен в оболочку из частиц  $\text{CaCO}_3$ ;

связующего элемента, включающего частицы частично прореагировавшего силиката кальция без четко выраженного ядра и корковый слой из диоксида кремния, заключенный в оболочку из частиц

$\text{CaCO}_3$ ; и

связующего элемента, включающего пористые частицы без четко выраженного коркового слоя диоксида кремния, заключенные в оболочку из частиц  $\text{CaCO}_3$ .

10. Связующая матрица по п.9, где не обладающую способностью к карбонизации фазу выбирают из диоксида кремния и мелилита.

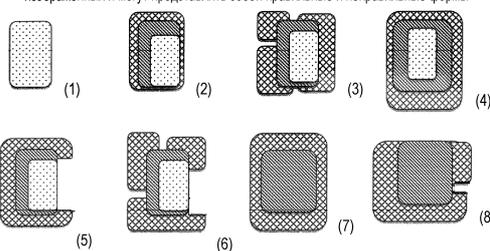
11. Связующая матрица по п.9 или 10, где фазу силиката кальция выбирают из волластонита, псевдоволластонита, ранкинита, белита и обладающих способностью к карбонизации аморфных силикатов кальция или комбинации двух или более из них.

12. Связующая матрица по любому из пп.9-11, дополнительно включающая одну или более пустот, расположенных в пространстве между связующими элементами, при этом необязательно один или более связующих элементов включают одну или более пустот.

13. Связующая матрица по любому из пп.9-12, где обогащенный диоксидом кремния корковый слой имеет толщину в диапазоне от приблизительно 0,01 мкм до приблизительно 50 мкм.

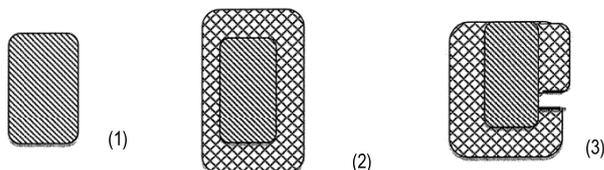
14. Связующая матрица по любому из пп.9-13, дополнительно включающая один или более материалов-заполнителей и необязательно включающая один или более дополнительных материалов, выбранных из зольной пыли, шлака и тонкой кремнеземной пыли.

Все изображенные формы частиц являются только иллюстрацией, и реальные формы отличаются от изображенных и могут представлять собой правильные и неправильные формы



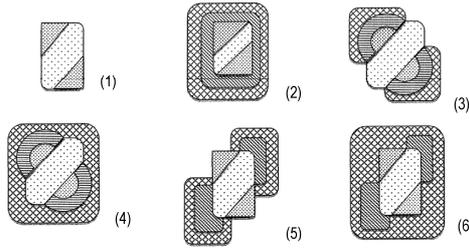
- |  |   |  |
|--|---|--|
|  | Реакционноспособная фаза                              | (1) Реакционноспособная или частично реакционноспособная фаза  |
|  | Диоксид кремния или корковый слой из диоксида кремния | (2) Частица ядра с обогащенным диоксидом кремния корковым слоем различной толщины, заключенным в оболочку из $\text{CaCO}_3$                 |
|  | Карбонат кальция ( $\text{CaCO}_3$ )                  | (3) Частица ядра с обогащенным диоксидом кремния корковым слоем различной толщины, частично заключенным в оболочку из $\text{CaCO}_3$        |
|  |   | (4) Частица ядра с обогащенным диоксидом кремния корковым слоем, полностью заключенным в оболочку из $\text{CaCO}_3$                         |
|  |   | (5) Частица ядра с частичным обогащенным диоксидом кремния корковым слоем, полностью заключенным в оболочку из $\text{CaCO}_3$               |
|  |   | (6) Частица ядра с частичным обогащенным диоксидом кремния корковым слоем, где корковый слой частично заключен в оболочку из $\text{CaCO}_3$ |
|  |   | (7) Полностью прореагировавшая частица ядра, частично заключенная в оболочку из $\text{CaCO}_3$  |

(a)



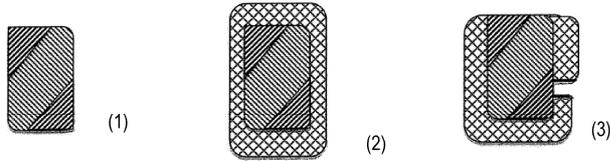
- |  |                                      |  |
|--|--------------------------------------|--|
|  | Диоксид кремния или инертная фаза    | (1) Инертная частица   |
|  | Карбонат кальция ( $\text{CaCO}_3$ ) | (2) Инертное ядро, полностью заключенное в оболочку из $\text{CaCO}_3$       |
|  |                                      | (3) Инертное ядро, частично заключенное в оболочку из частиц $\text{CaCO}_3$ |

(b)



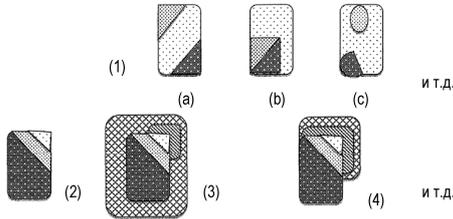
- Реакционноспособная фаза А
  - Реакционноспособная фаза В
  - Диоксид кремния или инертная фаза
  - Карбонат кальция (CaCO<sub>3</sub>)
- (1) Многофазная частица с фазой А и фазой В  
 (2) Частица ядра, в которой прореагировали фаза А и фаза В. Частица ядра полностью покрыта обогащенным диоксидом кремния корковым слоем различной толщины и полностью заключена в оболочку из CaCO<sub>3</sub>  
 (3) Частица ядра, в которой фаза В прореагировала, а фаза А не прореагировала. Фаза В покрыта обогащенным диоксидом кремния корковым слоем, и обогащенный диоксидом кремния корковый слой заключен в оболочку из CaCO<sub>3</sub>  
 (4) Частица ядра, в которой фаза В прореагировала, а фаза А не прореагировала. Фаза В покрыта обогащенным диоксидом кремния корковым слоем, и вся частица ядра заключена в оболочку из CaCO<sub>3</sub>  
 (5) Частица ядра, в которой фаза А прореагировала, а фаза В не прореагировала. Фаза А покрыта обогащенным диоксидом кремния корковым слоем, и обогащенный диоксидом кремния корковый слой заключен в оболочку из CaCO<sub>3</sub>  
 (6) Частица ядра, в которой фаза А прореагировала, а фаза В не прореагировала. Фаза А покрыта обогащенным диоксидом кремния корковым слоем, и вся частица ядра заключена в оболочку из CaCO<sub>3</sub>

(с)



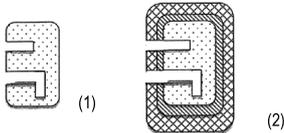
- Диоксид кремния или инертная фаза А
  - Диоксид кремния или инертная фаза В
  - Карбонат кальция (CaCO<sub>3</sub>)
- (1) Многофазное ядро с инертной фазой А или инертной фазой В  
 (2) Инертное ядро, полностью заключенное в оболочку из CaCO<sub>3</sub>  
 (3) Инертное ядро, частично заключенное в оболочку из частиц карбоната кальция (CaCO<sub>3</sub>)

(d)



- Реакционноспособная фаза А
  - Реакционноспособная фаза В
  - Инертная фаза С
  - Обогащенный диоксидом кремния корковый слой или инертная фаза
  - Карбонат кальция (CaCO<sub>3</sub>)
- (1) Многофазная частица с множеством реакционноспособных и инертных фаз  
 (2) Многофазная частица с множеством реакционноспособных и инертных фаз  
 (3) Одна реакционноспособная фаза, прореагировавшая и покрытая обогащенным диоксидом кремния корковым слоем различной толщины, полностью заключенным в оболочку из частиц CaCO<sub>3</sub>  
 (4) Две реакционноспособные фазы, прореагировавшие и покрытые обогащенным диоксидом кремния корковым слоем различной толщины, полностью заключенным в оболочку из частиц CaCO<sub>3</sub>

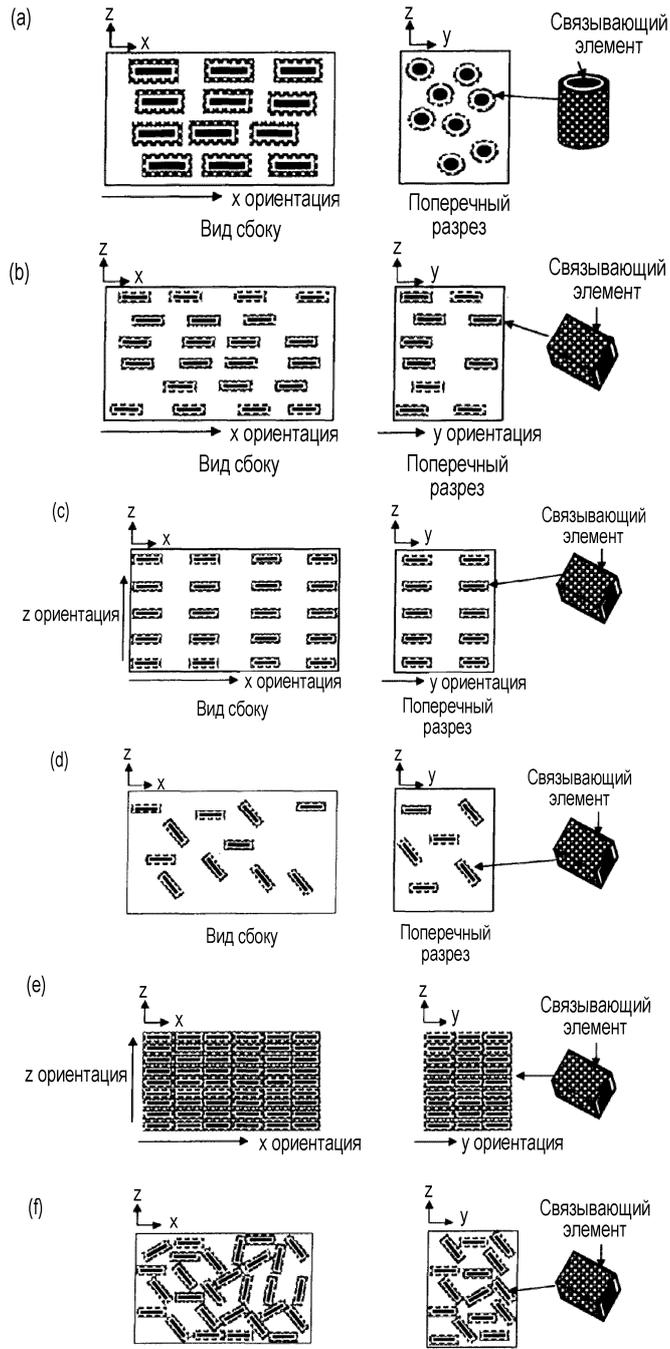
(e)



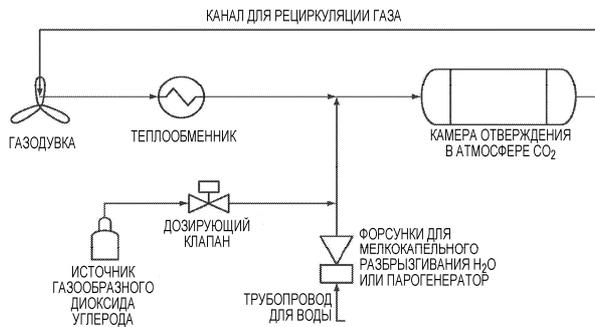
- Реакционноспособная фаза
  - Диоксид кремния или инертная фаза
  - Карбонат кальция (CaCO<sub>3</sub>)
- (1) Реакционноспособная частица с пустотами (правильной или неправильной формы)  
 (2) Частица ядра, прореагировавшая и покрытая обогащенным диоксидом кремния корковым слоем различной толщины, где обогащенный диоксидом кремния корковый слой заключен в оболочку из CaCO<sub>3</sub>

(f)

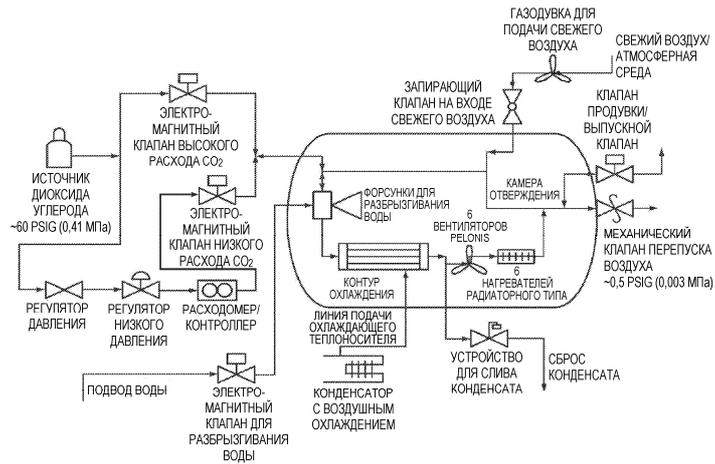
Фиг. 1



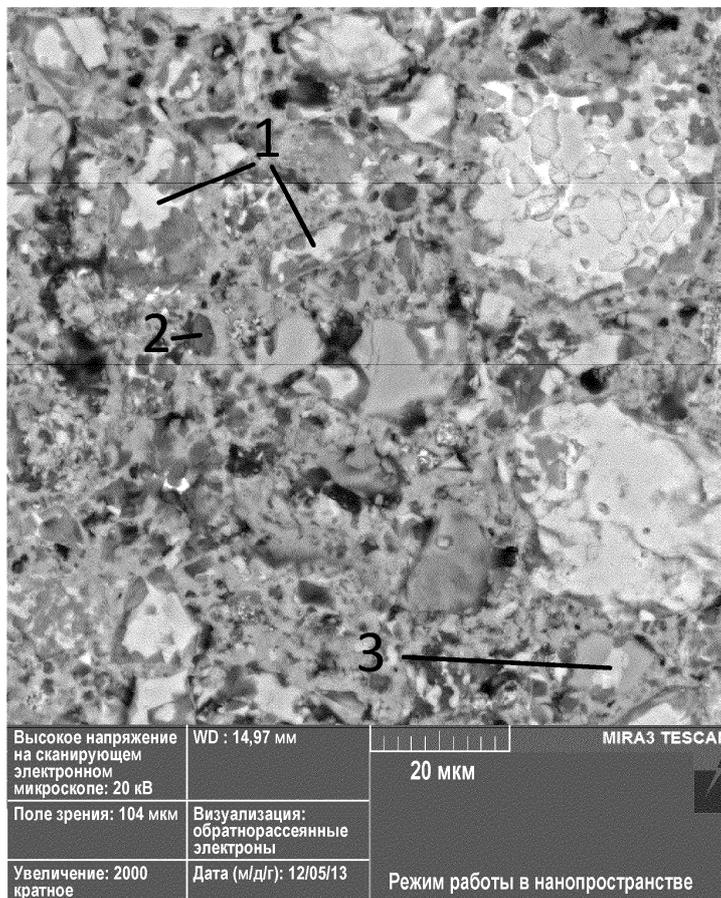
Фиг. 2



Фиг. 3

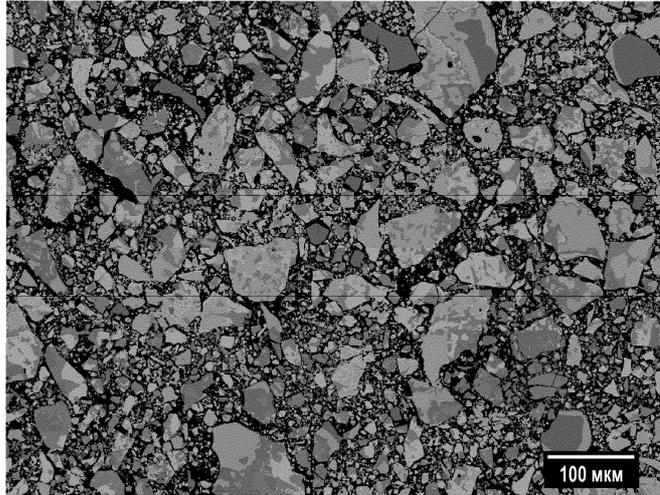


Фиг. 4



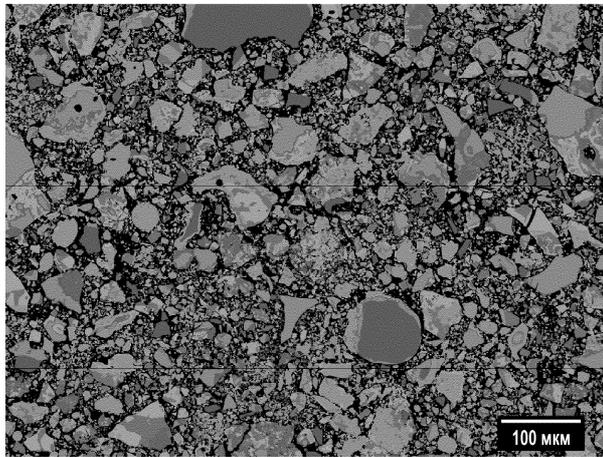
Фиг. 5

- Диоксид кремния
- Псевдоволластонит
- Мелилит
- Ранкинит
- Ларнит
- Браунмиллерит
- Аморфная фаза 1
- Аморфная фаза 2
- Пористость



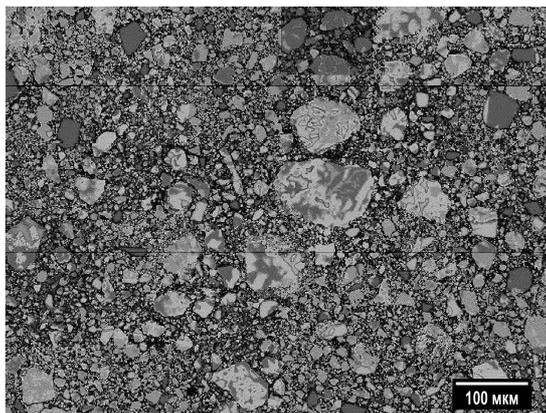
Фиг. 6

- Диоксид кремния
- Псевдоволластонит
- Мелилит
- Ранкинит
- Ларнит
- Браунмиллерит
- Аморфная фаза 1
- Аморфная фаза 2
- Пористость

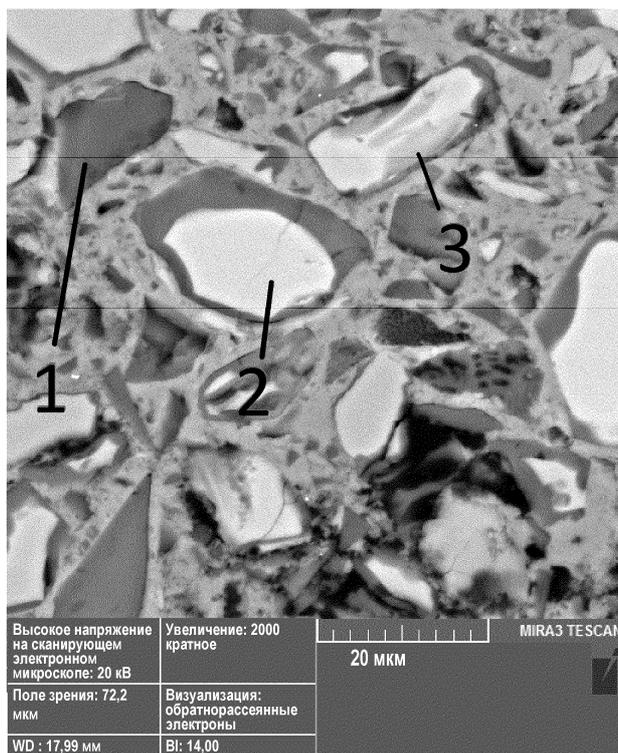


Фиг. 7

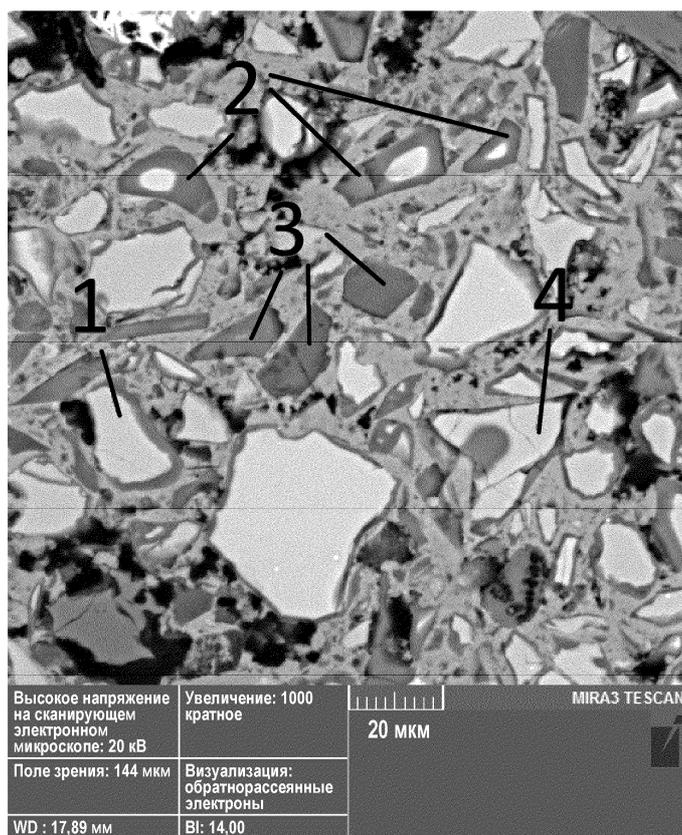
- Диоксид кремния
- Псевдоволластонит
- Мелилит
- Ранкинит
- Ларнит
- Браунмиллерит
- Аморфная фаза 1
- Аморфная фаза 2
- Пористость



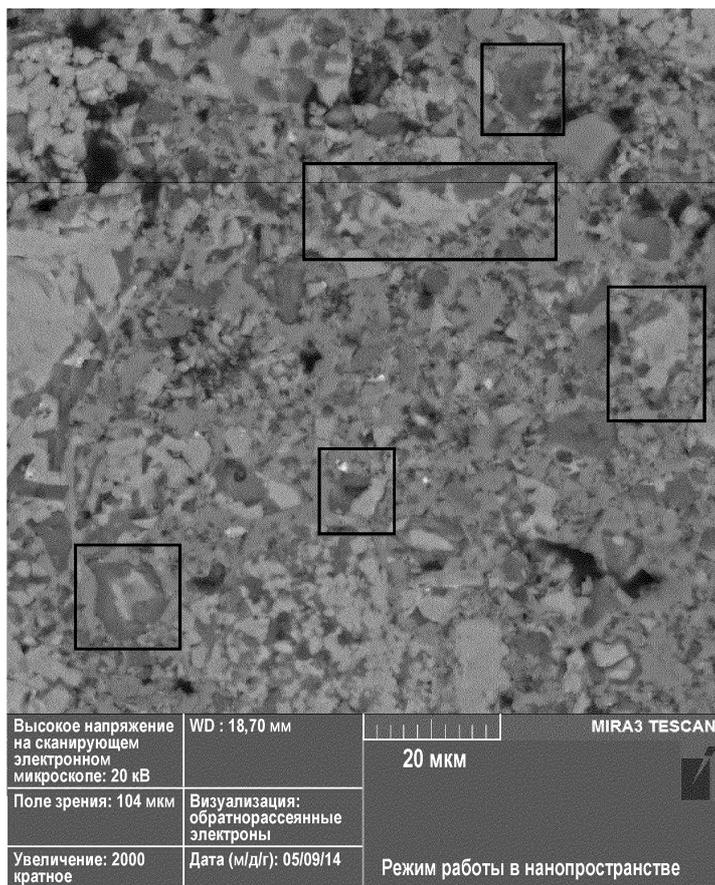
Фиг. 8



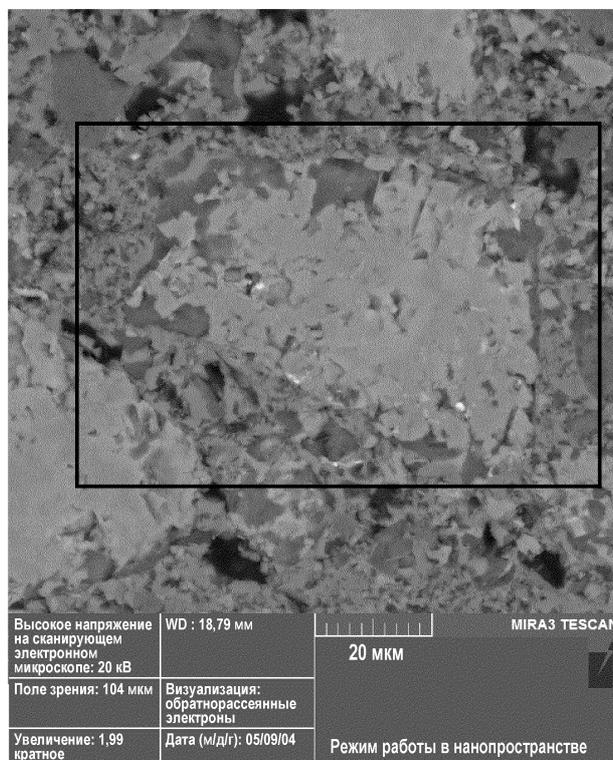
Фиг. 9



Фиг. 10



Фиг. 11



Фиг. 12

