

## Гомогенное осаждение гидратированного оксида и его применение для получения композиционных материалов

*П.Г. Кудрявцев*

*Polymate Ltd – Israel Nanotechnology Research Center, Israel*

**Аннотация.** В статье представлены результаты исследований процесса гомогенного осаждения гидратированного оксида алюминия. Рассмотрены варианты осуществления этого процесса. В качестве наиболее удобного варианта реализации этого процесса предложено осаждение гидратированного оксида алюминия из его солей с использованием вспомогательных веществ. В качестве таких вспомогательных веществ предложено использовать мочевины - карбамид. Гидролиз карбамида протекает медленно даже при нагревании, что позволяет проводить процесс гомогенного осаждения в наиболее мягких условиях. Показано, что процесс гидролитического осаждения в системе соль алюминия - карбамид протекает по диссоциативному механизму  $S_N1$ . Для  $S_N1$  характерен двухступенчатый механизм, в котором первой ступенью является медленная мономолекулярная гидролитическая диссоциация, а за ней следует быстрая реакция координации со вторым реагентом. Для определения характера взаимодействия соли алюминия со щелочными агентами были проведены эксперименты по потенциометрическому титрованию соли алюминия растворами аммиака и едкого натра в присутствии различного количества хлорида аммония и мочевины. При титровании раствором едкого натра процесс идет до образования алюмината натрия, при титровании раствором аммиака образуется осадок гидратированного оксида алюминия. Добавление солей аммония смещает равновесие реакции гидролиза в сторону образования гидроксида алюминия. Наличие мочевины практически не влияет на протекание процесса осаждения. Для определения однородности сформированного осадка применяли метод рассеяния лазерного излучения. Для этих целей была создана специальная установка, позволяющая просканировать капилляр через сфокусированный лазерный луч. Показана однородность формирующегося осадка гидратированного оксида алюминия. Были проведены исследования по применению гомогенно осажденного гидроксида алюминия в качестве связующего в легковесных волокнистых огнеупорных материалах. Процесс осаждения частиц гидроксида алюминия протекает, прежде всего, на волокнах наполнителя, покрывая их тонкой пленкой. Получающаяся пленка выступает в роли склеивающего агента. После сушки и прокалки осажденный тонкой пленкой гель становится твердым веществом, связывающим волокна в единый монолит. Получаемые материалы имеют развитую удельную поверхность и пористость.

**Ключевые слова:** гомогенное осаждение, гидратированный оксид алюминия, композиционные материалы, карбамид

### Введение

Развитие методов получения большого класса композиционных материалов опирается, в первую очередь, на применение новых неорганических связующих. К связующим системам относят составы,

обладающие смачиваемостью наполнителей, адгезией к наполнителям, способные к самопроизвольной конденсации, отверждению, при этом самопроизвольно или под действием внешних условий: нагревания, изменения рН, взаимодействия с отвердителем и т.д. Склеивая одинаковые или монолитизируя в материале порошкообразные, кусковые или волокнистые вещества, материалу в процессе изготовления можно придать форму готового изделия, применяя методы литья, прессования, пластического формования.

Известно большое количество разнообразных неорганических связующих. Большинство из них занимают промежуточное положение между истинными и коллоидными растворами, в большей степени приближаясь к коллоидным растворам [1]. Наиболее известным является кремнезоль [2]. Однако он обладает целым рядом недостатков. Кроме того, весьма сложно получить кремнезоль, в котором бы отсутствовали примеси щелочных металлов. В этом плане большие возможности открываются при использовании алюмозоля [3-5].

Коллоидный раствор гидратированного оксида алюминия (алюмозоль) по своему поведению в процессе получения композиционных материалов и по некоторым своим физико-химическим свойствам мало чем отличается от кремнезоля. Технология получения материалов на его основе практически не отличается от технологии получения композитов на основе кремнезоля. При этом применение алюмозоля в качестве связующего имеет ряд существенных преимуществ. Во-первых, композиция обогащается по оксиду алюминия, тем самым повышается термостойкость материала. Во-вторых, материалы получают более прочными, чем с кремнезolem и распределение связующего по объему образца более равномерно. В-третьих, применение алюмозоля практически исключает его отходы, поскольку гель на его основе подвергается дальнейшей пептизации и снова может быть использован в качестве связующего [1]. Однако, коллоидный раствор оксида алюминия

---

имеет и определенные отличия от кремнезоля. Эти отличия заключаются, прежде всего, в механизме управления процессом гелеобразования. Если в случае кремнезоля одним из самых важных факторов процесса гелирования является его рН, то для алюмо-золя таким фактором является соотношение количеств аниона к алюминию. Это соотношение регулируется добавлением в него соляной или азотной кислоты. Применение алюмозоля в качестве связующего является одним из наиболее перспективных направлений в области создания огнеупорных композиционных материалов.

### **1. Гомогенное осаждение гидратированного оксида алюминия**

Существуют различные способы получения гидроксида алюминия, интерес представляют способы, базирующиеся на осаждении, так как при осаждении получают гидроксид алюминия, обладающий наибольшей, поверхностной активностью. Осаждение можно производить: из гомогенной среды; при переменном и постоянном значении рН, в периодическом и непрерывном режимах [6].

Гомогенные методы химического осаждения используются для получения высокодисперсных соединений. В основе метода лежит реакция гидролиза основного и вспомогательного вещества. Для данных методов характерно следующее - при смешивании раствора, в котором содержится осаждаемое вещество, и реагента, который используется в качестве основания, осаждение не происходит, система остается гомогенной. Осаждение и образование осадка возможно тогда, когда под воздействием какого-либо фактора реагент-основание начинает изменять свой химический состав, вследствие чего начинается осаждение.

Выделяют следующие варианты гомогенного осаждения [7]:

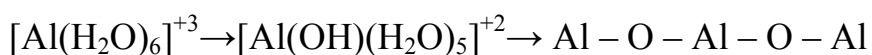
- 1) глубокий гидролиз основного компонента, в результате чего образуются продукты гидролиза.

2) гидролиз вспомогательного компонента, который является щелочным агентом.

1. Получение  $Al(OH)_3$  методом выкрутки.

Суть способа: разбавленный раствор соли алюминия длительное время перемешивают, при этом происходит гидролиз и формирование продуктов гидролиза. Конечным продуктом гидролиза является  $Al(OH)_3$ .

Чаще всего применяется алюминат натрия (раствор щелочной, концентрация  $OH$ -групп достаточно высокая). Из внутренней координационной сферы происходит вытеснение молекул воды за счет гидролиза ионов алюминия и формируется ряд комплексов, с образованием твердой фазы.



2. Осаждение гидратированного оксида алюминия из его солей с использованием вспомогательных вещества.

Если систему  $Al(NO_3)_3 + CO(NH_2)_2$  нагревать, то карбамид разлагается на  $CO_2$  и  $NH_4OH$  (гидролиз карбамида протекает медленно даже при нагревании  $90-95^{\circ}C$ ). В системе образуется основание и, следовательно, растет концентрация  $OH$ -групп в системе, в результате чего начинается гидролиз соли  $Al(NO_3)_3$ . Чем больше концентрация  $OH$ -групп, тем больше скорость и, следовательно, степень гидролиза.

В результате гидролиза происходит вытеснение лигандов из внутренней координационной сферы и образование  $OH$ -группы. В основе лежит образование мономерных комплексных соединений. Мономеры объединяются в димеры, далее в тримеры и т.д. Образуется твердая фаза.

Данный способ получения называют золь-гель способ. Он лежит в основе получения наноматериалов, т.е. полученные соединения имеют нано размер. Метод гомогенного осаждения применяется для удаления примесей в растворах. Вводят реагенты, в присутствии которых протекает

каталитическая полимеризация металлов или ионов металлов, которые являются примесью.

Для данного метода характерны преимущества:

1) в системе отсутствуют локальные пересыщения, т.к. образующийся щелочной реагент равномерно распределяется во всем объеме и поэтому во всем объеме одновременно происходит образование новой твердой фазы. Следовательно, если нет локальных пересыщений и во всем объеме образуется твердая фаза, то она имеет одинаковый химический состав в каждой точке реакционного пространства и одинаковый фазовый состав.

2) при таком осаждении не достигается значительного пересыщения в системе и, следовательно, имеет место формирование глобул примерно одинакового размера. Таким образом, управляя процессом золь-гель перехода, можно достичь образования осадка с приблизительно одинаковым размером частиц (монодисперсных частиц).

Недостатки:

1) Этот процесс может быть только периодическим и, следовательно, малопродуктивным (применяется только для малотоннажных производств).

2) Образующаяся твердая фаза имеет низкую скорость фильтрации и отмывки.

Метод осаждения из гомогенной среды базируется на постепенном выделении осадителя при разложении какого-либо вещества непосредственно в объеме раствора, содержащего осаждаемый реагент.

Широкое распространение получили методы синтеза осадков при взаимодействии исходных веществ с аммиаком, выделяющимся в гомогенной среде при разложении мочевины. При комнатной температуре мочевины не гидролизуются, поэтому гидроксид алюминия не образуется, и среда остается гомогенной. При нагревании до температуры выше 70° и постепенном увеличении рН происходит гидролиз мочевины, в результате

---

которого в растворе появляются молекулы  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}_2$ , и ионы  $\text{OH}^-$ , и становится возможным образование осадка. Вследствие того, что выделения аммиака  $\text{NH}_3$  и ионов  $\text{OH}^-$  происходит равномерно во всем объеме раствора и скорость его регулируется, появляется возможность избежать местных пересыщений и, следовательно, неоднородности осадка.

## 2. Изучение механизма гомогенного осаждения гидратированного оксида алюминия

Преимущества использования мочевины как осадителя – получение плотного, хорошо фильтрующегося и легко промываемого осадка. При осаждении из гомогенного раствора наблюдается меньшая сорбция посторонних ионов образующимся гидратированным оксидом чем при его осаждении аммиаком. Недостаток метода - большая продолжительность осаждения (1,5 ÷ 2 ч). Осаждение лучше вести из растворов сульфатов или в присутствии солей органических кислот. Осаждение из растворов нитратов или хлоридов дает менее удовлетворительные результаты [8].

При гомогенном осаждении, кроме осаждения в объеме раствора, гидроксиды и оксигидраты металлов способны осаждаться на поверхности различных подложек, создавая тонкий слой геля гидроксида. Метод осаждения гидроксидов металлов на подложках нашел применение для получения тонкослойных неорганических сорбентов и некоторых композиционных материалов [9,10].

Нами проводились исследования процесса гидролитического осаждения гидроксида алюминия. Это сложный процесс нуклеофильного замещения, он может протекать по двум механизмам: ассоциативному ( $\text{S}_{\text{N}}2$ ) и диссоциативному ( $\text{S}_{\text{N}}1$ ).

Для механизма  $\text{S}_{\text{N}}2$  степенью, определяющей скорость, является бимолекулярная реакция, в которой один нуклеофильный реагент замещается другим. Для  $\text{S}_{\text{N}}1$  характерен двухступенчатый механизм, в котором первой

ступенью является медленная мономолекулярная гидролитическая диссоциация, а за ней следует быстрая реакция координации со вторым реагентом.

Процесс гидролитического осаждения обычно протекает по диссоциативному механизму  $S_N1$ . Поэтому наиболее удобным является рН-метрическое исследование процесса гидролиза, которое проводилось в термостатируемой ячейке при различных температурах с использованием иономера в качестве прибора для контроля рН и ионной силы раствора.

Результаты исследований по совместному гидролизу хлорида алюминия и мочевины представлены на рисунке 1. Этот процесс носит довольно сложный многоступенчатый характер. Наиболее важным фактором, определяющим скорость гидролиза, является температура, которая не только определяет скорость процесса, но и в определенной мере меняет его постадийный механизм.

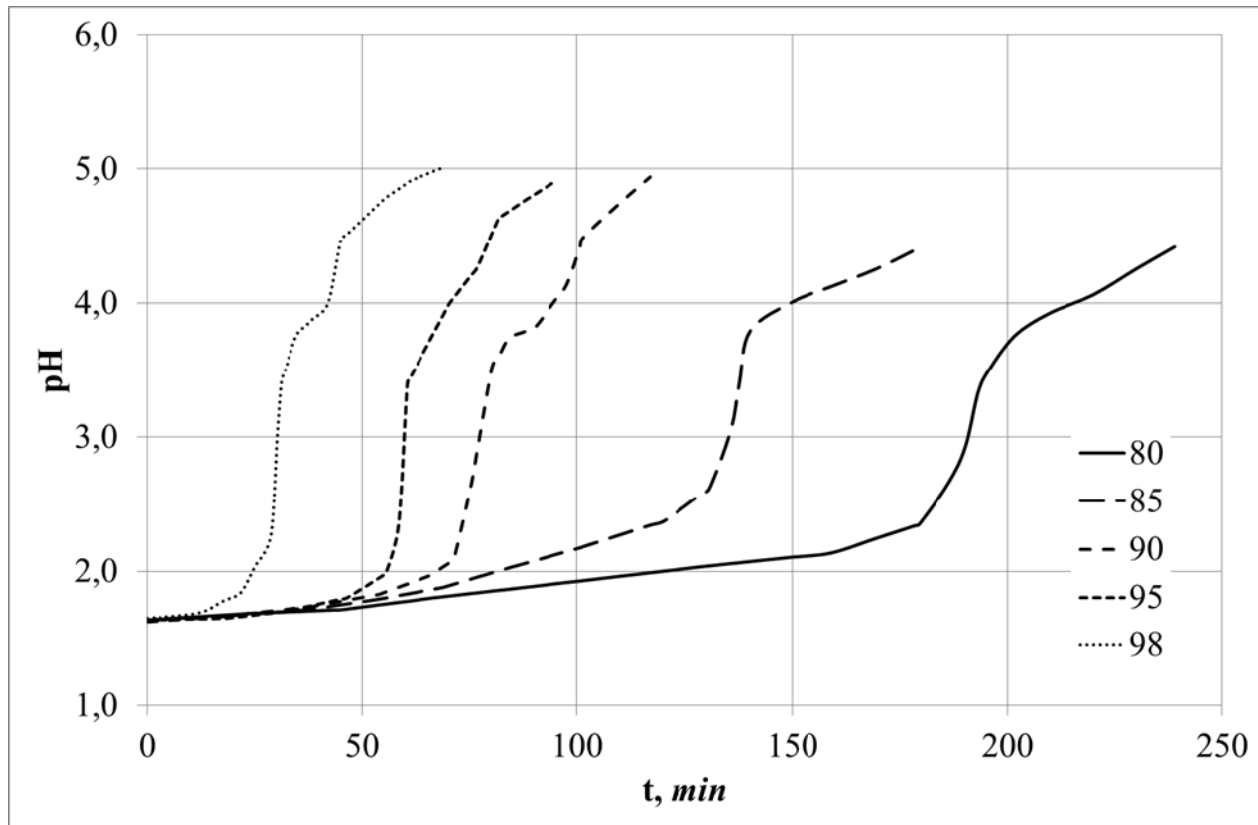


Рисунок 1. Кинетические кривые совместного гидролиза 1 М  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  и 0,1 М  $\text{AlCl}_3$ .

На первой стадии идет образование золя основных солей алюминия. На второй стадии наблюдается дальнейший гидролиз основных солей алюминия с образованием целевого продукта - геля гидратированного оксида алюминия. Регулируя температуру, концентрацию реагентов, можно влиять на скорости образования золя гидроксида алюминия, используемого в качестве связующего.

Метод центрифугирования с использованием аналитической центрифуги ТН-21 заключался в следующем. Смешанные растворы соли алюминия и мочевины термостатировались в круглодонных колбах с обратным холодильником. Через определенные промежутки времени отбирались пробы раствора, которыми заполняли капилляры диаметром 1 мм. Капилляры с одной стороны изолировались мастикой и центрифугировались со скоростью 12000 об/мин в течение 7,5 мин. С помощью специальной измерительной линейки определялась относительная высота столба осадка, по которой устанавливался объем выделившейся твердой фазы.

На рисунке 2 представлена зависимость относительного количества геля, образующегося при совместном гидролизе соли алюминия и мочевины, от времени. Образование геля зависит от концентрации реагентов, оно происходит спонтанно за очень короткий промежуток времени во всем объеме раствора, причем количество его при дальнейшем нагревании не меняется.

Для определения характера взаимодействия соли алюминия со щелочными агентами были проведены эксперименты по потенциометрическому титрованию соли алюминия растворами аммиака и едкого натра в присутствии различного количества хлорида аммония и мочевины. Кривые титрования приведены на рисунок 3. Наличие солей аммония в растворе обуславливает возникновение значительной буферности системы, уменьшение конечного значения рН раствора.



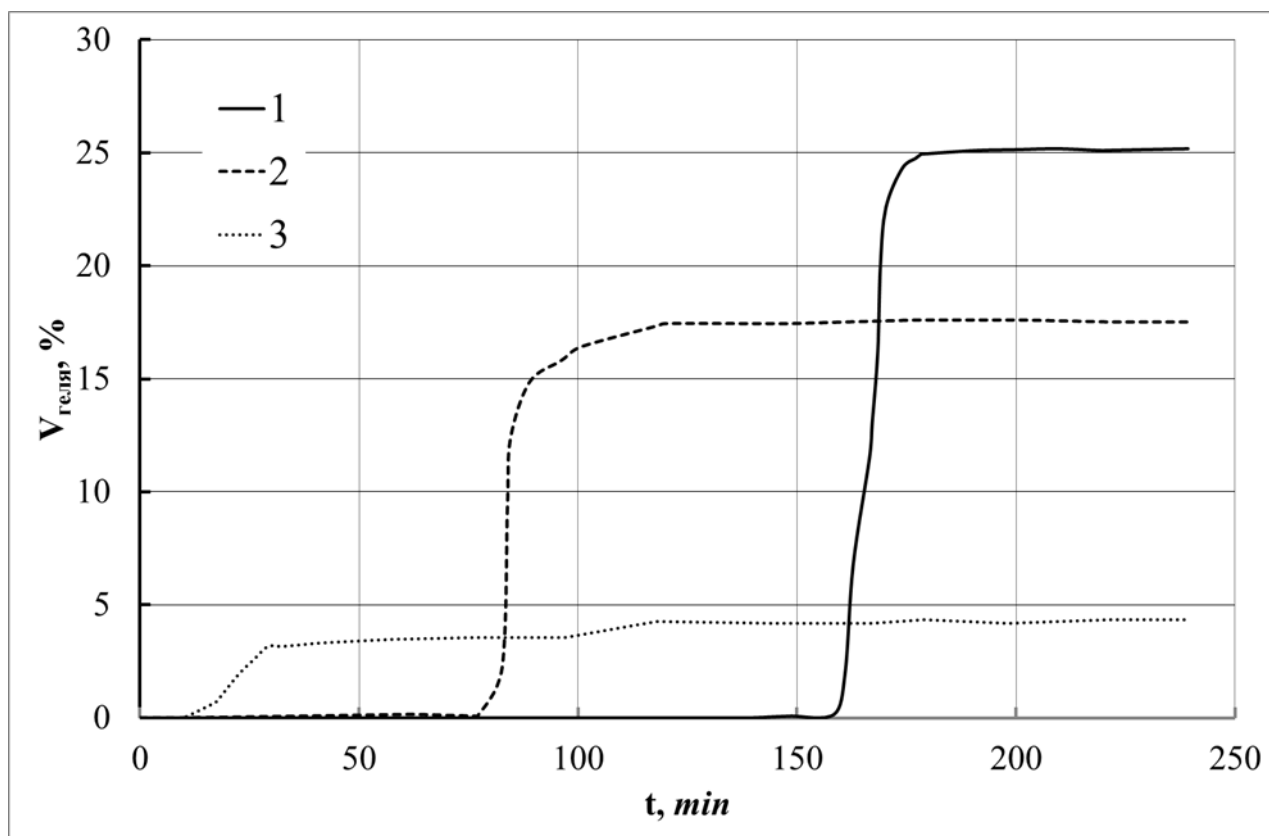


Рисунок 2. Кривые осаждения твердой фазы геля  $Al(OH)_3$ . Концентрация мочевины составляет  $C_{CO(NH_2)_2} = 1$  М. Концентрация хлорида алюминия, соответствующая различным кривым, составляет: 1 - 0,1 М; 2 - 0,05 М; 3 - 0,01 М

При титровании раствором едкого натра процесс идет до образования алюмината натрия, при титровании раствором аммиака образуется осадок гидратированного оксида алюминия. Добавление солей аммония смещает равновесие реакции гидролиза в сторону образования гидроксида алюминия. Наличие мочевины практически не влияет на протекание процесса осаждения.

Для определения однородности сформировавшегося осадка применяли метод рассеяния лазерного излучения. Для этих целей была создана специальная установка, позволяющая просканировать капилляр через сфокусированный луч [11]. Схема установки представлена на рисунке 4.

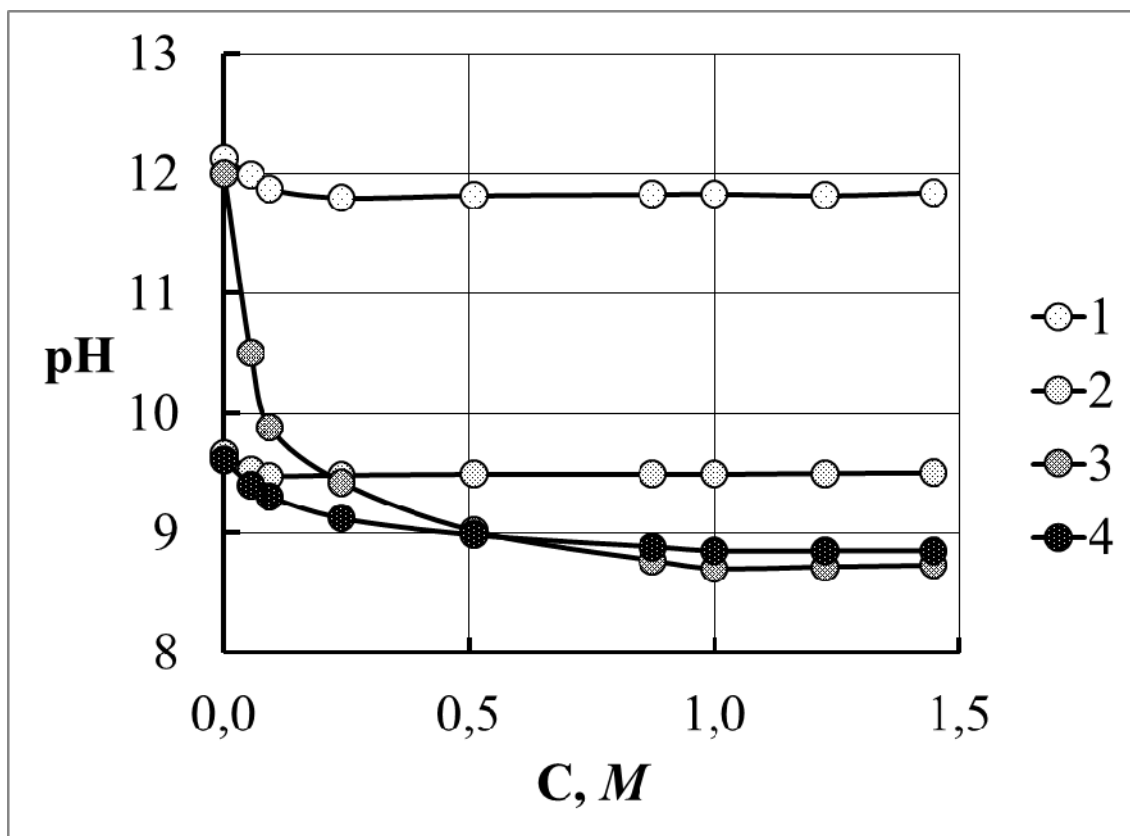


Рисунок 3. Предельные значения pH при потенциометрическом титровании 0,1N раствора хлорида алюминия 0,1 М растворами NaOH (кривые 1, 3) и NH<sub>4</sub>OH (кривые 2, 4) в зависимости от концентрации мочевины (кривые 1, 2) и хлорида аммония (кривые 3, 4).

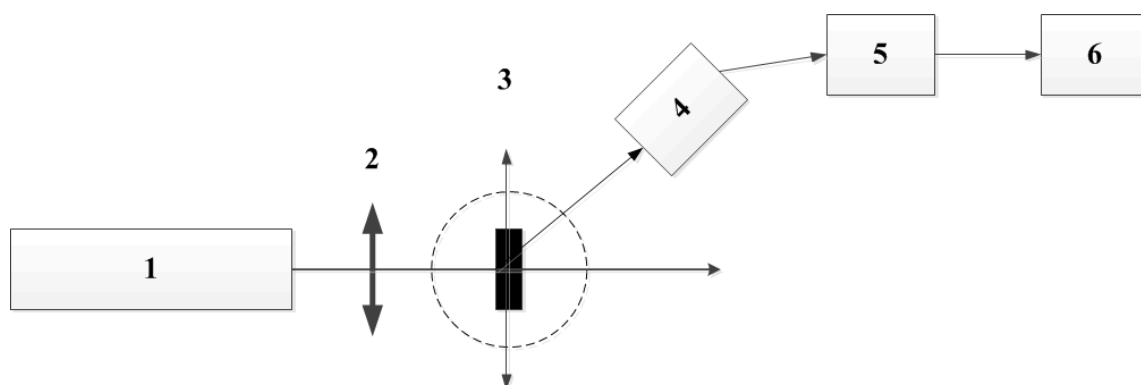


Рисунок 4. Установка для изучения рассеяния лазерного излучения на капиллярах с осадком:

1 - He-Ne лазер с длиной волны  $\lambda = 600 \text{ нм}$ ; 2 - фокусирующая линза; 3 - исследуемый образец с устройством для перемещения вдоль оси; 4 – фотометрический датчик; 5 - усилитель; 6 – регистрирующий блок

Для обеспечения сканирования исследуемого образца строго по оси капилляра, была разработана специальная приставка, позволяющая

перемещать капилляр вдоль оси, перпендикулярной падающему лазерному лучу. Равномерное поступательное движение капилляра осуществляется с помощью синхронного электродвигателя с шестеренчатой передачей. Установка для измерения лазерного рассеяния смонтирована на базе фотополяриметра КФК-2. Интенсивность рассеяния определялась с помощью фотоэлемента, расположенного под углом  $45^\circ$  к лазерному лучу. Капилляр сканировался с постоянной скоростью, а интенсивность рассеяния записывалась на самописце Н-301.

Достоверность результатов измерения лазерного рассеяния обеспечивается при однородности аппаратурной системы:

$$d_{\text{л}} \ll d_{\text{к}}$$

где  $d_{\text{л}}$  - диаметр лазерного луча;  $d_{\text{к}}$  - диаметр капилляра.

Для определения однородности структуры гидроксида алюминия, сформированного при гомогенном осаждении, пробы растворов после термической обработки помещали в стеклянный капилляр и центрифугировали при скорости 12000 об/мин в течение 7,5 мин для осаждения и уплотнения осадка гидратированного оксида алюминия. В капиллярах после центрифугирования изучалось рассеяние лазерного излучения при сканировании вдоль оси капилляра. Типичная кривая рассеяния представлена на рисунке 5.

Из полученных данных видно, что сформированная твердая фаза однородна по структуре, она имеет очень резкую границу раздела с жидкой фазой. В случае возникновения неоднородности в структуре образующихся осадков, то в объеме твердой фазы должны возникать градиенты плотности, а скачек плотности, на наблюдаемых кривых сканирования, имел бы пологий вид. Кроме того, распределение интенсивности рассеяния вдоль участка твердой фазы также указывает на его однородность, так как на кривой сканирования отсутствуют значительные отклонения от средней плотности.

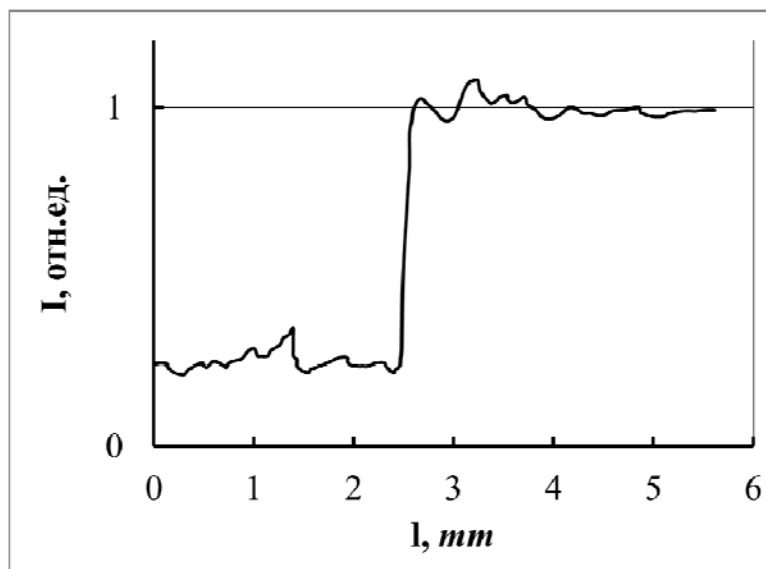


Рисунок 5. Интенсивности рассеяния лазерного излучения при сканировании вдоль оси капилляра

Таким образом, при изучении процесса гомогенного осаждения оксигидрата алюминия определены факторы, влияющие на процесс (температура, концентрация реагентов, pH среды и т.д.), установлена однородность формируемого осадка.

### **3. Применение гомогенно осажденного гидроксида алюминия в качестве связующего**

Метод гомогенного осаждения связующего основан на постепенном выделении осадителя при разложении какого-либо вещества непосредственно в объеме раствора, содержащего осажденный реагент.

В качестве примера можно привести результаты экспериментов по получению легковесного теплозащитного материала. В данном случае реализован метод осаждения гидроксида алюминия при взаимодействии хлорида алюминия с аммиаком, выделяющимся в гомогенной среде при разложении мочевины. Так как при комнатной температуре мочевины не гидролизуются, то в отсутствии нагрева гидроксид не осаждается, и среда

остается гомогенной. При нагревании до температуры выше 70 °С происходит гидролиз мочевины, в результате которого в растворе появляются  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{OH}^-$  и становится возможным образование осадка. Вследствие того, что выделение  $\text{NH}_3$ ,  $\text{OH}^-$  происходит равномерно во всем объеме раствора и скорость его легко регулируется, имеется возможность избежать местных пресыщений и, следовательно, неоднородности выделения осадка. Такая методика позволяет достичь весьма равномерного состава и строения осадка. Получение осадка в гомогенной среде приводит к образованию на первом этапе процесса мельчайших центров гидроксида алюминия, которые в дальнейшем растут во времени. При наличии в системе центров зародышеобразования рост частиц происходит, прежде всего, на этих центрах. Волокна муллитокремнеземистого состава, имеющиеся в системе при получении легковесных материалов, являются, таким образом, центрами зародышеобразования. Процесс осаждения частиц гидроксида алюминия протекает, прежде всего, на них, покрывая их тонкой пленкой. Получающаяся пленка выступает в роли склеивающего агента, который при последующей сушке претерпевает превращение гель—ксерогель и становится твердым веществом, связывающим волокна в единый монолит. Получаемые материалы имеют развитую удельную поверхность и пористость.

Исследования полученных ранее материалов показали существенную зависимость их свойств от плотности. Зависимость предела прочности при 10 % сжатии от плотности представлена на рисунке 6. Из рисунка 6 видно, что эта зависимость носит сложный характер, хотя в ней четко прослеживается основная тенденция роста прочностных характеристик с ростом плотности образцов. Поскольку плотность материала, прежде всего, определяется количеством осажденного связующего, можно предположить, что при плотностях меньше  $0,17 \text{ г/см}^3$  наличие малого количества связующего не позволяет с достаточной прочностью и в достаточном количестве скрепить

все волокна наполнителя в структуре получаемого материала.

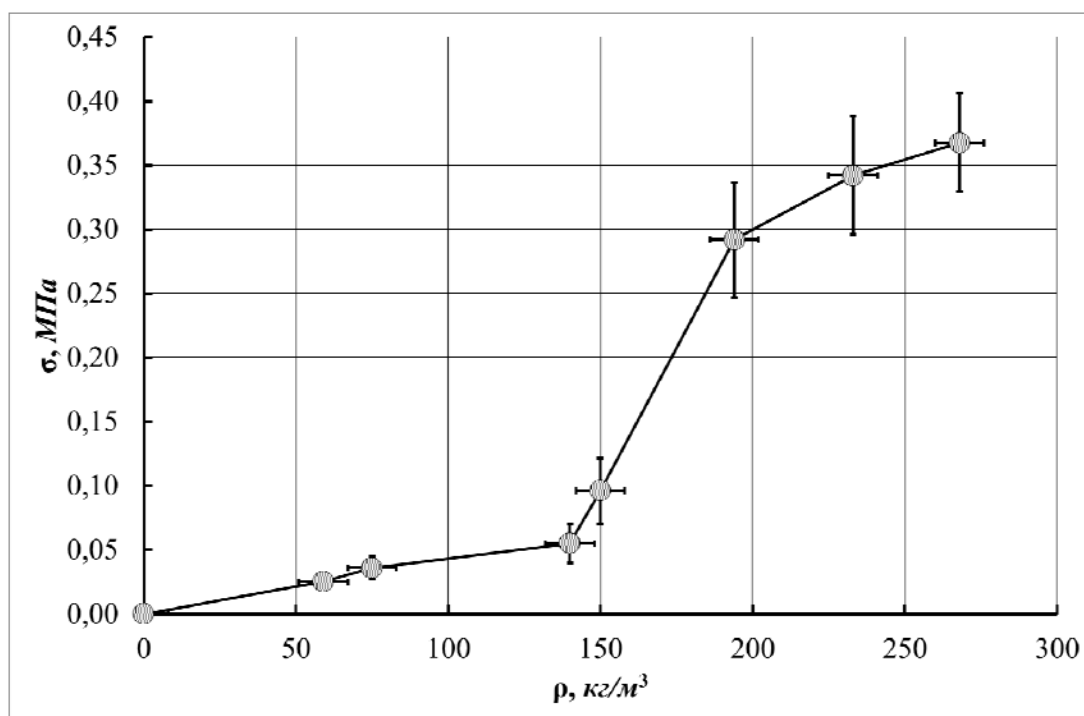
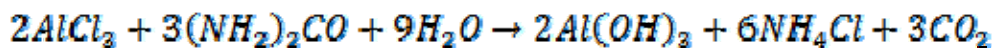


Рисунок 6. Зависимость прочности на сжатие от плотности материалов со связующим на основе гидроксида алюминия, полученного гомогенным осаждением.

При этом формируется очень легкий, но обладающий низкой прочностью материал. При больших содержаниях связующего, прочность повышается, а ее рост становится достаточно монотонным, хотя и остается при этом на весьма низком уровне. Одной из причин формирования слабого контакта между волокнами можно объяснить наличием в системе хлорида аммония, образующегося в результате реакции:



Хлорид аммония при сушке выделяется в виде тонкодисперсных частиц, которые разрушают структуры образующихся гелей, резко снижая их прочностные характеристики. Таким образом, метод гомогенного осаждения связующего на поверхности волокон не позволяет получать достаточно прочные материалы, однако, эти материалы обладают повышенной термостойкостью.

#### 4. Заключение

Проведены исследования процесса гомогенного осаждения гидратированного оксида алюминия. Рассмотрены варианты осуществления этого процесса. В качестве наиболее технологичного варианта реализации этого процесса предложено осаждение гидратированного оксида алюминия из его солей с использованием вспомогательных веществ. В качестве таких вспомогательных веществ использована мочевины - карбамид. Гидролиз карбамида протекает медленно даже при нагревании, что позволяет осуществлять процесс гомогенного осаждения гидратированного оксида алюминия в наиболее мягких условиях. Показано, что процесс гидролитического осаждения в системе соль алюминия - карбамид протекает по диссоциативному механизму  $S_N1$ . Для механизма  $S_N1$  характерен двухступенчатый механизм, в котором первой ступенью является медленная мономолекулярная гидролитическая диссоциация, а за ней следует быстрая реакция координации со вторым реагентом.

Для определения характера взаимодействия соли алюминия со щелочными агентами были проведены эксперименты по потенциометрическому титрованию соли алюминия растворами аммиака и едкого натра в присутствии различного количества хлорида аммония и мочевины. При титровании раствором едкого натра процесс идет до образования алюмината натрия, при титровании раствором аммиака образуется осадок гидратированного оксида алюминия. Добавление солей аммония смещает равновесие реакции гидролиза в сторону образования гидроксида алюминия. Наличие мочевины практически не влияет на характер протекания процесса осаждения. Для определения однородности сформировавшегося осадка применяли метод рассеяния лазерного излучения. Для этих целей была создана специальная установка, позволяющая сканировать капилляр с полученным раствором с помощью

сфокусированного лазерного луча. Показана однородность формирующегося осадка гидратированного оксида алюминия.

Для практической реализации метода гомогенного осаждения были проведены исследования по применению гомогенно осажденного гидроксида алюминия в качестве связующего в легковесных волокнистых огнеупорных материалах. В предлагаемом варианте реализации процесса получения материала, осаждения частиц гидроксида алюминия протекает, прежде всего, на волокнах наполнителя, покрывая их тонкой пленкой. Получающаяся пленка выступает в роли склеивающего агента. После сушки и прокаливания осажденный гель, в виде тонкой пленки, становится твердым веществом, связывающим волокна в единый монолит. Получаемые материалы имеют развитую удельную поверхность и пористость.

### Литература

1. Kudryavtsev P. Heat-resistant inorganic binders, Journal "Scientific Israel-Technological Advantages", 2017, Vol. 19, № 2, pp. 32-37, ISSN: 1565-1533
  2. Kudryavtsev P., Figovsky O. Nanomaterials based on soluble silicates. Monograph, LAP Lambert Academic Publishing, 2014, 241 p. ISBN 978-3-659-63556-4
  3. Kudryavtsev P., Kudryavtsev N. Nanocomposite materials based on soluble aluminum compounds, Journal "Scientific Israel-Technological Advantages", Vol. 19, № 3, 2017, pp. 40-76, ISSN: 1565-1534
  4. Kudryavtsev P.G., Kudryavtsev N.P., Figovsky O.L. The soluble aluminum compounds and nanocomposite materials based on them. Part I. Nanotehnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction. 2018, Vol. 10, № 1, pp. 37–62. DOI: [dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-1-37-62](https://doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-1-37-62). (In Russian).
  5. Kudryavtsev P.G., Kudryavtsev N.P., Figovsky O.L. The soluble aluminum compounds and nanocomposite materials based on them. Part II. Nanotehnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction. 2018, Vol. 10, № 2, pp. 63–85. DOI: [dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-2-63-85](https://doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-2-63-85). (In Russian).
-



6. Дзисько В.А. Основы методов приготовления катализаторов. Новосибирск, Наука, 1983, 260с.
7. Вассерман И.А. Химическое осаждение из растворов. Л.: Химия, 1980. 208 с.
8. Тихонов В. Н. Аналитическая химия алюминия. М.: Наука, 1971. С. 58.
9. Кудрявцев П.Г., Клячкин Ю.С. Модифицирование поверхности материалов за счет осаждения частиц золя //Тез. докл. республиканской научно-технической конференции "Формирование поверхности и межфазные взаимодействия в композитах". Ижевск, 1987. С. 11-13.
10. Кудрявцев П.Г., Клячкин Ю.С. Математическое моделирование процессов модифицирования поверхностей материалов за счет осаждения коллоидных частиц //Тез. докл. областной научно-технической конференции "Математическое моделирование в процессах производства и переработки полимерных материалов". Пермь, 1908. С. 17-18.
11. Кропачева М.В. Изучение процессов гомогенного осаждения оксигидрата алюминия, В сб.: Композиционные материалы на основе дисперсных систем, Екатеринбург, 1994, с.41-46.

### References

1. Kudryavtsev P. Journal "Scientific Israel-Technological Advantages", 2017, Vol. 19, № 2, pp. 32-37, ISSN: 1565-1533
2. Kudryavtsev P., Figovsky O. Nanomaterials based on soluble silicates. Monograph, LAP Lambert Academic Publishing, 2014, 241 p. ISBN 978-3-659-63556-4
3. Kudryavtsev P., Kudryavtsev N. Journal "Scientific Israel-Technological Advantages", Vol. 19, № 3, 2017, pp. 40-76, ISSN: 1565-1534
4. Kudryavtsev P.G., Kudryavtsev N.P., Figovsky O.L. Nanotehnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction. 2018, Vol. 10, № 1, pp. 37–62. DOI: dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-1-37-62. (In Russian).



5. Kudryavtsev P.G., Kudryavtsev N.P., Figovsky O.L. Nanotehnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction. 2018, Vol. 10, № 2, pp. 63–85. DOI: dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-2-63-85. (In Russian).
6. Dzis'ko V.A. Osnovy metodov prigotovleniya katalizatorov. [Basics of methods for the preparation of catalysts]. Novosibirsk, Nauka, 1983, 260p.
7. Vasserman I.A. Himicheskoe osazhdenie iz rastvorov. [Chemical precipitation from solutions]. L.: Himiya, 1980. 208 p.
8. Tihonov V. N. Analiticheskaya himiya alyuminiya. [Analytical chemistry of aluminum]. M.: Nauka, 1971. p. 58.
9. Kudryavcev P.G., Klyachkin YU.S. Tez. dokl. respublikanskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii "Formirovanie poverhnosti i mezhfaehnye vzaimodejstviya v kompozitah". Izhevsk, 1987. pp. 11-13.
10. Kudryavcev P.G., Klyachkin YU.S. Tez. dokl. oblastnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii "Matematicheskoe modelirovanie v processah proizvodstva i pererabotki polimernyh materialov". Perm', 1908. pp. 17-18.
11. Kropacheva M.V. Izuchenie processov gomogenogo osazhdeniya oksigidrata alyuminiya, V sb.: Kompozicionnye materialy na osnove dispersnyh sistem, Ekaterinburg, 1994, pp.41-46.