

Научная статья

УДК 66.017

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-7-119-133

ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ НИТЕВИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ ТУГОПЛАВКИХ СОЕДИНЕНИЙ

В.Г. Бабашов¹, В.В. Викулин¹, Н.М. Варрик¹, Т.А. Карасева¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Нитевидные кристаллы тугоплавких соединений обладают высокими термомеханическими свойствами. Благодаря небольшим размерам и бездефектной структуре они имеют высокие прочность и модуль упругости, что делает их ценным армирующим наполнителем для композиционных материалов. В данной статье рассмотрены основные механизмы модели роста усов оксида алюминия и методы их получения. В последнее время отмечен возрастающий интерес к технологиям получения нитевидных кристаллов. Усы муллита и оксида алюминия могут быть востребованы при производстве композиционных материалов.

Ключевые слова: нитевидные кристаллы, тугоплавкие соединения, оксид алюминия, муллит, механизмы роста кристаллов, композиционный материал

Для цитирования: Бабашов В.Г., Викулин В.В., Варрик Н.М., Карасева Т.А. Основные методы получения нитевидных кристаллов тугоплавких соединений // Труды ВИАМ. 2026. № 7 (161). С. 119–133. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-7-119-133.

Scientific article

MAIN METHODS FOR OBTAINING WHISKERS OF REFRACTORY COMPOUNDS

V.G. Babashov¹, V.V. Vikulin¹, N.M. Varrik¹, T.A. Karaseva¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. Whiskers of refractory compounds have high thermomechanical properties. Due to their small size and defect-free structure, they have high strength and high elastic modulus, which makes them a valuable reinforcing filler for composite materials. This article discusses the main mechanisms of the aluminum oxide whiskers growth model and methods for their production. There is a growing interest in production technology of refractory compound whiskers. Mullite and alumina oxide whiskers will be in demand in the production of composite materials.

Keywords: whiskers, refractory compounds, aluminum oxide, mullite, crystal growth mechanisms, composite material

For citation: Babashov V.G., Vikulin V.V., Varrik N.M., Karaseva T.A. Main methods for obtaining whiskers of refractory compounds. *Trudy VIAM*, 2026, no. 7 (161), pp. 119–133. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-7-119-133.

Введение

Технический прогресс сопровождается инновациями в создании новых материалов с заданными свойствами и технологий их получения. Многофункциональные композиционные материалы, сочетающие компоненты, обеспечивающие высокие температуры эксплуатации, высокую химическую стойкость, высокие теплофизические свойства, являются приоритетом в развитии материаловедения [1, 2].

В качестве армирующих наполнителей композиционных материалов используют различные виды тугоплавких частиц, придающих готовому продукту повышенные теплофизические свойства. В последние десятилетия созданы дисперсно-упрочненные материалы и защитные покрытия на основе металлических, керамических и полимерных матриц, которые содержат тугоплавкие компоненты в качестве армирующих наполнителей [3, 4].

Нитевидные кристаллы – это монокристаллы в форме иголок и волокон, которые могут быть получены из тугоплавких соединений, таких как карбид и нитрид кремния, оксид алюминия, и других высокотемпературных материалов. Нитевидные кристаллы тугоплавких соединений обладают высокими термомеханическими свойствами. В частности, благодаря небольшим размерам монокристаллов с бездефектной структурой, они имеют высокие прочность и модуль упругости, которые сохраняют до высоких температур, так как в них отсутствуют процессы рекристаллизации, из-за которых обычно снижается прочность поликристаллов. Нитевидные кристаллы тугоплавких соединений сохраняют также химическую инертность по отношению ко многим металлическим, полимерным и керамическим материалам до весьма высоких температур, что делает их ценным армирующим наполнителем для композиционных материалов.

Существуют различные методы получения нитевидных кристаллов, такие как осаждение из газовой фазы, сопровождающееся химическими реакциями, физическое испарение с последующей конденсацией, кристаллизация растворов, направленная кристаллизация сплавов, рост нитевидных кристаллов на пористых мембранах, электроформование и лазерный синтез [5–25].

Развитие технологий получения нитевидных кристаллов, обеспечивающее удешевление продукта, воспроизводимость и повышение его свойств, способствует все более широкому использованию нитевидных кристаллов различных соединений во многих областях промышленности. В частности, полупроводниковые кристаллы нашли применение в оптоэлектронных устройствах и высокоскоростной СВЧ-электронике, кроме того, нитевидные кристаллы используются в химическом катализе, биомедицине и при преобразовании энергии.

Исследования и разработки последних лет показывают, что нитевидные кристаллы могут использоваться в композиционных материалах, износостойких резинах, герметиках и т. д. в качестве армирующего компонента.

Эти работы выдвигают на первый план проблемы относительно дешевого, технологичного экологически чистого производства нитевидных кристаллов. В настоящее время как за рубежом, так и в России определилось достаточно большое количество методов выращивания кристаллов наиболее перспективных соединений, таких как SiC, Al₂O₃, Si₃N₄, AlN, B₄C, MgO и ряд других. В значительных объемах производятся нитевидные кристаллы карбида кремния (и отчасти нитрида алюминия), что связано с существованием технологичных способов производства данных нитевидных кристаллов. В России существует опытно-промышленное производство нитевидных кристаллов SiC и ZnO в газовом потоке на гомогенно-конденсируемых подложках.

Поисковые работы в области создания композиционных материалов, упрочненных нитевидными кристаллами, начаты еще в 1960-х гг. Однако представляющие интерес металлические композиционные материалы с нитевидными кристаллами получены

только методом направленной кристаллизации эвтектических расплавов, в которых присутствие незначительного (5–10 % (объемн.)) количества кристаллов в матрицах на основе кобальта и никеля позволяет значительно повысить кратковременную и длительную прочность при температурах ~1000 °C [8].

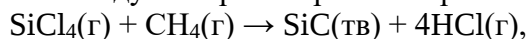
Модели механизма роста нитевидных кристаллов

Для нитевидных кристаллов тугоплавких соединений, имеющих высокие температуры плавления, не растворяющихся в большинстве обычных растворителей и, как правило, диссоциирующих при температурах ниже температуры плавления, основным методом получения служит метод осаждения из газовой фазы [9–11]. Применяющийся иногда метод кристаллизации из расплавов является наиболее сложным, дорогим и применение его ограничивается относительно узким кругом кислородных соединений.

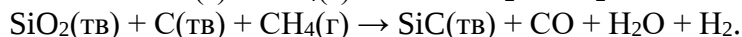
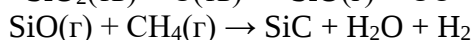
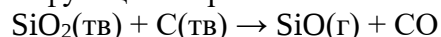
Метод осаждения из газовой фазы состоит в том, что нитевидный кристалл нужного соединения конденсируют из парогазовой фазы, содержащей образующие кристалл элементы в виде паров или их газообразные (при температуре роста) соединения, которые способны в результате химического взаимодействия с компонентами парогазовой смеси выделять искомое соединение в виде твердой фазы. Процессы и реакции, используемые для роста эпитаксиальных пленок, для покрытий и порошков могут использоваться при получении нитевидных кристаллов – например, для выращивания кристаллов карбида кремния по реакции пиролиза метилсиланов:



или по реакциям замещения между четыреххлористым кремнием и углеводом



а также по реакциям с образованием промежуточных летучих соединений, например субоксида SiO, выполняющих функцию переносчика в газовой фазе:



Существует несколько теоретических подходов для объяснения механизма одностороннего роста нитевидных кристаллов на подложках.

В середине 1950-х гг. была предложена диффузно-дислокационная модель роста нитевидных кристаллов [15]. Исходя из этой модели, считалось, что рост нитевидных кристаллов, в том числе и тугоплавких соединений, возможен при наличии выходов винтовых дислокаций на поверхность подложки. Предполагалось, что рост нитевидных кристаллов идет преимущественно за счет пристройки атомов к незарастающей ступеньке на выходе дислокации. По мере вращения ступеньки кристалл поднимается над поверхностью и быстро удлиняется в осевом направлении, совпадающем с направлением вектора Бюргерса дислокации. Исходя из диффузно-дислокационного механизма, необходимыми и достаточными условиями конденсации вещества в форме нитевидных кристаллов должны быть низкие пересыщения при конденсации, не превышающие минимально необходимые для двумерного зародышеобразования, и наличие на подложке из того же вещества или структурно похожего вещества выходов винтовых дислокаций.

Диффузно-дислокационный механизм очень хорошо объясняет уникальную морфологию нитевидных кристаллов, их быстрый осевой рост и рост при низких пересыщениях, явно недостаточных для роста с участием двумерного зародышеобразования. Поэтому долгое время эта модель привлекалась для объяснения почти всех явлений, связанных с ростом нитевидных кристаллов. Даже противоречащие дислокационному механизму явления пытались объяснить с позиций этой теории. Например, отсутствие винтовых дислокаций в нитевидных кристаллах объясняли выходом их из кристалла в процессе роста или после его окончания.

Но предложенная теория не могла дать практически никаких технологических рекомендаций по вопросам, возникающим при разработке методов и технологии получения нитевидных кристаллов.

Иной механизм роста нитевидных кристаллов предложен в середине 1960-х гг. в работах [16, 17], который получил название механизма «пар–жидкость–твердая фаза» (ПЖТ). Основная идея этой теории состоит в том, что конденсация при росте нитевидных кристаллов идет не прямым путем из паровой фазы в твердую, а через промежуточную жидкую фазу. Необходимым и обязательным условием роста нитевидных кристаллов по этому механизму является наличие на подложке капель жидкой фазы.

Создатели ПЖТ-механизма считали, что при росте нитевидных кристаллов тугоплавких соединений капля жидкой фазы должна быть образована одним из элементов, составляющих данное соединение – например, кремнием при росте кристаллов SiC или алюминием для усов оксида алюминия. Однако последующие исследования показали, что возможен способ выращивания нитевидных кристаллов с введением в зону роста присадок элементов-растворителей, которые способны образовывать жидкие тройные растворы с элементами осаждаемого соединения и выделять это соединение кристаллизацией из раствора в твердую фазу [21–23]. В этом случае равновесное состояние капли расплава не зависит от колебания состава газовой фазы, так как регулируется путем изменения своего состава. Определенные требования к элементам-растворителям позволяют проводить их выбор для выращивания кристаллов того или иного соединения, опираясь только на диаграммы состояния тройных систем. Анализ показал, что в качестве элементов-растворителей тугоплавких соединений могут использоваться вполне доступные материалы, например: для кристаллов карбида кремния – никель, железо, алюминий; для кристаллов оксида алюминия – кремний, железо, свинец и т. д.

В 1967 г. в работе [19] предложена модель роста нитевидных кристаллов, не зависящая от наличия винтовых дислокаций и не требующая дислокационных ступенек и наличия примесей, образующих жидкую фазу.

Как и в диффузно-дислокационной модели рост нитевидных кристаллов связывается с явлениями поверхностной диффузии атомов. Отличие механизма состоит в том, что диффундирующие атомы встраиваются не в ступеньку винтовой дислокации, а закладываются поверхностными ростовыми ступеньками, преобразующими у нитевидных кристаллов форму круговых концентрических ступенек. Стимулятором роста нитевидных кристаллов может служить любой дефект реальной поверхности – например, конус или любое другое возвышение. Согласно данному механизму, нитевидные кристаллы должны быть бездислокационными, вершины должны иметь вид ступенчатого конуса, а закон удлинения должен подчиняться тому же закону, что и рост по диффузно-дислокационному механизму.

Рост нитевидных кристаллов можно разделить на два процесса: зародышеобразование и собственно рост кристаллов. Рост кристаллов может происходить и по диффузно-дислокационному механизму, но зародышеобразование из газовой фазы идет по ПЖТ-механизму, который является определяющим для роста нитевидных кристаллов.

После открытия ПЖТ-механизма проведено большое количество исследований как в СССР, так и за рубежом; получены нитевидные кристаллы из различных материалов – кремния, германия, карбида кремния, углерода, оксида алюминия, бора, а также проведены исследования кинетики роста и механизма образования кристаллов.

В работах ученых НИЦ «Курчатовский институт – ВИАМ» в 1970-х гг. установлено, что при осаждении тугоплавких соединений по ПЖТ-механизму с участием химических реакций закономерности кинетики осевого роста оказываются значительно более сложными, чем при росте кристаллов элементов из атмосферы собственного пара. При этом присутствие жидкой фазы в качестве активного катализатора открывает возможности интенсификации процессов роста [18–25].

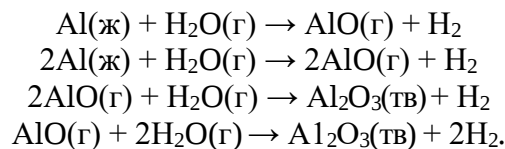
С начала 2000-х гг. интерес к нитевидным кристаллам начал возрастать благодаря новым возможностям исследований и практическому применению нанокристаллов. В частности, исследования полупроводниковых нитевидных кристаллов стали одной из самых интенсивно развивающихся областей [5–9, 26].

Группа ученых из Воронежского технического университета под руководством В.А. Небольсина сообщает о современном состоянии дел в области роста нитевидных кристаллов и критическом пересмотре взглядов на механизмы их роста. Авторы предлагают новую теорию капельного механизма роста нанокристалла, констатируя, что ПЖТ-механизм имеет прочную методологическую основу и хорошо исследован, однако недостаточно изучены активирующая роль жидкой капли и механизм ее движения вверх от подложки и вытягивания за собой кристалла. Согласно предложенной авторами теории капельного механизма, рост нанокристалла активируется жидкой каплей металла-катализатора и обусловлен работой сил поверхностного натяжения капли и анизотропией свободной поверхностной энергии кристаллизующего материала. Отличие капельного механизма от диффузно-дислокационной и ПЖТ-модели роста в том, что сфероидизирующая капля служит облегчающим кристаллизацию источником свободной энергии [27, 28].

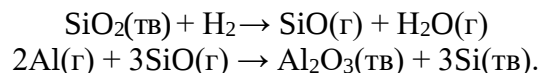
Нитевидные кристаллы оксида алюминия востребованы для создания композиционных материалов, поэтому наблюдается также рост публикационной активности по изучению процессов роста кристаллов α - Al_2O_3 и муллита.

Применяемые методы получения нитевидных кристаллов оксида алюминия

Основной способ получения нитевидных кристаллов оксида алюминия [29, 30] опубликован еще в 1957 г. и получил название метода окисления во влажном водороде. Первоначально предполагалось, что образование нитевидных кристаллов идет путем поэтапного окисления алюминия содержащейся в водороде влагой с образованием промежуточных летучих соединений AlO или Al_2O по реакциям:



Позднее выяснилось [31, 32], что для роста кристаллов оксида алюминия необходимо проводить его в муллитовой керамике, содержащей SiO_2 . В связи с этим возникло предположение, что окислителем алюминия является не влага в водороде, а моноксид кремния, образующийся в результате восстановления водородом в муллите оксида кремния:



Дальнейшие исследования [21] показали, что эта точка зрения недостаточно обоснована. Основная роль муллита сводится, по-видимому, к образованию жидких капель с составами систем Si-Al , Fe-Al , Fe-Si-Al путем восстановления водородом оксидов SiO_2 и Fe_2O_3 в муллите. Рост усюв оксида алюминия идет из капель указанных составов по ПЖТ-механизму. Известно также применение в дальнейшем процессе в качестве элементов-растворителей присадок в зоне роста олова [33], железа [34] и других элементов.

В работе [14] нитевидные кристаллы оксида алюминия получены при температурах 1250–1300 °С в водороде с влажностью, соответствующей точке росы, и содержанием 0,05–0,10 % кислорода. В качестве источника алюминия использовали алюминиевые порошки.

Процесс осуществляли в ростовых сборках, схема которых приведена на рис. 1.

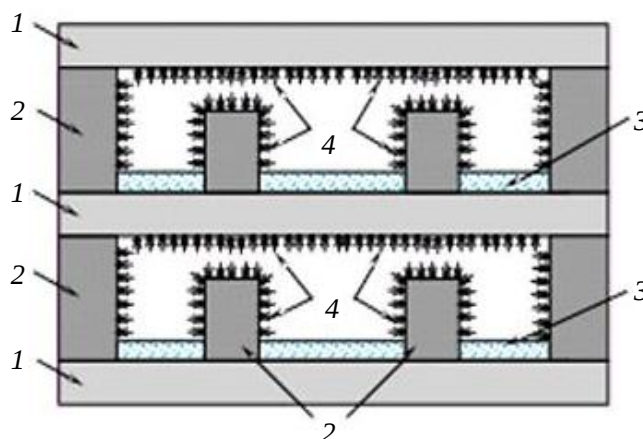
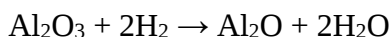


Рис. 1. Ростовая сборка для выращивания нитевидных кристаллов $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$: 1 – плита высокоглиноземистая; 2 – продольная перегородка; 3 – алюминиевый порошок; 4 – нитевидные кристаллы $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ [32]

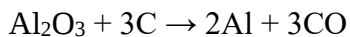
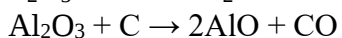
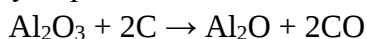
В зависимости от габарита рабочего пространства печи каждая такая сборка содержит от двух до пяти плоскопараллельных плит 1 из высокоглиноземистого огнеупора, пространство между которыми делится продольными перегородками 2, вдоль которых продувается водород. Алюминиевый порошок 3 засыпается в пространство между перегородками. Кристаллы 4 вырастают в основном в местах, показанных на схеме: в верхней части перегородок на их углах и на крышке над перегородками, образованной плитой следующего этапа сборки. Сборки подобной конструкции можно использовать в периодических печах и в печах с непрерывным перемещением сборок через рабочую зону.

Другим способом получения нитевидных кристаллов является так называемый хлоридный метод выращивания кристаллов. Подобный способ разработан У. Кэмпбеллом [20], который предложил смешивать газообразные реагенты в кристаллизационной камере. В такой камере скорость осаждения материала регулируют скоростью подачи газов и их температурой либо дозируют парциальные давления реагентов и продуктов реакции, обеспечивая непрерывный рост кристаллов.

В производстве нитевидных кристаллов оксида алюминия важное значение имеет процесс высокотемпературного восстановления оксида алюминия до промежуточного моно- или полуоксида с последующей конденсацией корунда в виде нитевидных кристаллов при более низкой температуре. Пересыщение в подобного рода процессах создается перепадом температур между зонами восстановления и конденсации. Контроль температурного градиента позволяет направленно влиять на степень пересыщения и тем самым регулировать ход процесса в зоне конденсации, кинетику роста и количество кристаллов [23]. При этом методе получения нитевидных кристаллов используются следующие реакции:



или восстановление алюминия углеродом



Установлено, что процесс восстановления, идущий с применением углерода, более эффективен и позволяет улучшить морфологию выросших кристаллов.

Большинство процессов выращивания нитевидных кристаллов позволяет достаточно надежно и в широких пределах варьировать длину и диаметр кристаллов в зависимости от их назначения. Так, длиноволокнистые нитевидные кристаллы получают для переработки в пряжу, коротковолокнистые – для изотропных и ориентированных матов и бумаги.

Основным недостатком известных способов получения нитевидных кристаллов является их низкая производительность. Для всех наиболее разработанных процессов она приблизительно одинакова и составляет 0,05–0,1 г/ч на литр объема рабочего пространства с учетом только времени работы печи в режиме роста кристаллов. Практически это означает 150–200 кг в год для печи объемом $\sim(1-2) \text{ м}^3$. Это приемлемая величина пока идут опытные работы, но для промышленного производства она очень низкая.

Один из способов решения этой проблемы – разработка соответствующей аппаратуры для создания непрерывного процесса производства нитевидных кристаллов.

Так, фирмой «Дженерал Электрик» предложен способ непрерывного производства нитевидных кристаллов оксида алюминия в установке, принципиальная схема которой приведена на рис. 2 [35].

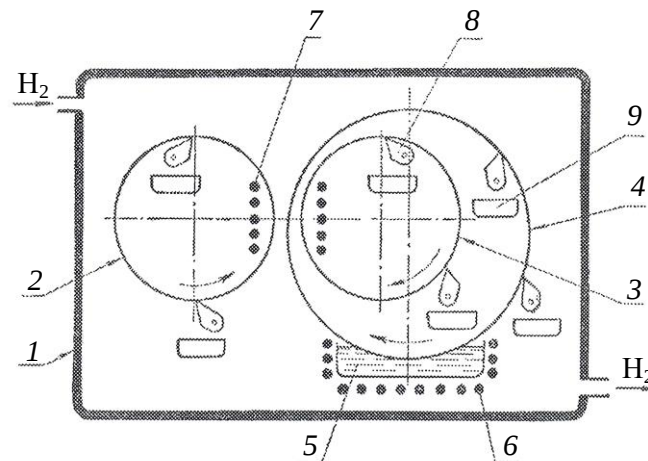


Рис. 2. Схема непрерывного выращивания нитевидных кристаллов $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$: 1 – камера; 2–4 – вращающийся обод; 5 – ванна с алюминием; 6 – нагреватель; 7 – индуктор; 8 – ножи; 9 – накопительный контейнер

В герметичной камере 1 продуваемой водородом, на трех отдельных валах вращаются ободы (2–4). Средний обод 4 в нижней части проходит через помещенную в нагреватель 6 ванну 5 с расплавленным алюминием, где покрывается пленкой алюминия. Все три обода близко сходятся внутри индуктора 7, в котором на них идет рост кристаллов. Образующиеся кристаллы снимают ножами 8 и принимают в накопительный контейнер 9. По сообщениям фирмы срок непрерывной работы установки достигает 1 мес. [35].

В патенте британской компании Atomic Energy Authority [31] предложен вариант непрерывной работы установки для получения нитевидных кристаллов оксида алюминия, представленной на рис. 3.

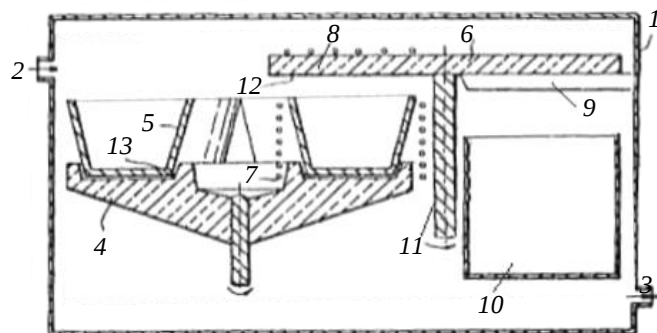


Рис. 3. Установка для производства нитевидных кристаллов оксида алюминия: 1 – герметичный контейнер; 2, 3 – впускное и выпускное отверстия для прохождения водорода; 4 – огнеупорный блок; 5 – тигель; 6 – диск; 7, 8 – нагреватели; 9 – скребок; 10 – приемный контейнер; 11 – вращающийся стержень; 12 – поверхность роста нитевидных кристаллов; 13 – углубление для тигля [31]

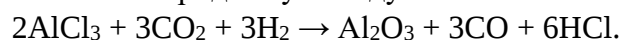
Герметичный контейнер 1 снабжен впускным 2 и выпускным 3 отверстиями для прохождения через него газообразного водорода, а также огнеупорным блоком 4, имеющим углубление 13 для размещения тигля 5. Диск 6, соединенный с коаксиальным стержнем 11, выполнен с возможностью вращения вокруг оси стержня; электронагревательные резисторы 7 и 8 установлены в фиксированном положении для нагрева сплава в тигле 5 и поверхности 12 диска 6 соответственно; внутри контейнера закреплен скребок 9 для удаления выросших усов с поверхности 12 подложки, которые собираются с помощью приемного контейнера 10, расположенного под скребком. Огнеупорный блок 4 обычно изготавливают из инертного огнеупорного материала. Тигель 5 выполнен из силлиманита, а диск 6 представляет собой литую конструкцию, выполненную из муллита и соединенную с муллитовым стержнем 11. Сплав доводится до расплавленного состояния в непрерывном потоке газообразного водорода с помощью электрических резисторов 7. Алюминий напыляют на поверхность 12 подложки, где зарождается рост нитевидных кристаллов, при этом на поверхности 12 подложки с помощью резисторных нагревателей 8 поддерживается постоянная температура $\sim 1500^\circ\text{C}$.

Группа тиглей 5, содержащих сплав, расположена с интервалами; поворотный стол транспортирует каждый тигель по очереди в зону плавления под диском 6, где сплав расплавляется и доводится до указанного температурного диапазона с помощью резистивных нагревателей 7, после чего рост на поверхности подложки 12 из предыдущего тигля прекращается. Возможность загружать группу тиглей в контейнер 1 позволяет повысить производительность процесса производства нитевидных кристаллов.

В опытно-промышленных условиях для производства нитевидных кристаллов Al_2O_3 также используются стандартные полуметодические печи, оборудованные толкательными механизмами для перемещения ростовых сборок через реакционную зону. Выращивание производится в ростовых сборках, похожих по конструкции на сборку, изображенную на рис. 1.

Основными недостатками подобных печей применительно к производству нитевидных кристаллов являются сравнительно небольшая величина полезного объема ростовой зоны относительно общих размеров печи и значительные затраты труда на обслуживание, загрузку и выгрузку сборок, шлюзование сборок в форкамерах и т. д.

Принципиально иной способ выращивания нитевидных кристаллов оксида алюминия предложен У. Кэмпбэллом [20]. Процесс заключается в выращивании кристаллов в газовом потоке на взвешенных частицах. Рост осуществляется на частицах порошка оксида алюминия по хлоридному методу:



Блок-схема установки для осуществления процесса приведена на рис. 4.

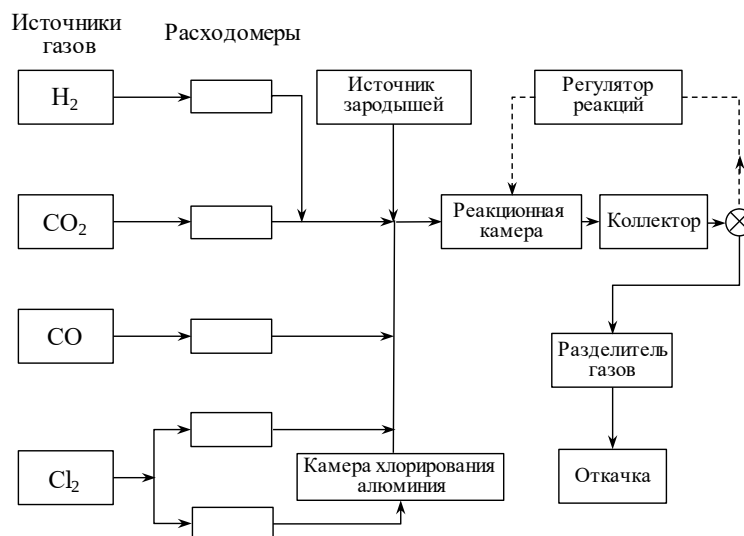


Рис. 4. Блок-схема установки У. Кэмпбелла для непрерывного получения нитевидных кристаллов оксида алюминия в газовом потоке на микроподложках

Порошок вводят вместе с газовым потоком в верхнюю часть вертикального реактора, нагретого до температуры 1300–1500 °С.

Взвешенные в потоке частицы порошка служат центрами кристаллизации, на которых по мере их осаждения происходит рост и удлинение кристаллов. На выходе из реактора кристаллы улавливаются на фильтре. Однако если исходить из концепции ПЖТ-механизма, частицы твердого порошка оксида алюминия не могут служить центрами кристаллизации для нитевидных кристаллов при отсутствии на них жидкой фазы [25]. Видимо поэтому до сих пор нет данных о применении этого процесса для выращивания нитевидных кристаллов.

Следует отметить, что интерес к нитевидным кристаллам тугоплавких соединений постоянно возрастает. Прогресс в технологиях и методах исследования механизмов направленного роста кристаллов позволяет использовать новые подходы к получению монокристаллических тугоплавких соединений, в частности оксида алюминия. Начиная с 1960-х гг. и до настоящего времени постоянно появляются запатентованные решения методов получения усов на основе тугоплавких оксидов.

В качестве примеров можно отметить патенты американских компаний Union Carbide [36], General Electric [35], Horizons Inc. [37], General Technologies Corp. [38]. Среди британских заявителей отмечены патенты на получение усов оксида алюминия компаний Atomic Energy Authority [31] и Hepworth & Grandage Limited [39].

В последние два десятилетия интерес к данной теме возрастает, разработчики совершенствуют методы получения нитевидных кристаллов оксида алюминия и муллита, добиваясь высокого качества кристаллов, упрощения и удешевления технологии.

В частности, в патенте американской компании Dow Chemical предложен способ получения нитевидных кристаллов муллита путем нагрева нестехиометрической смеси, содержащей алюминий и кремний, до температуры 500–950 °С в присутствии газа SiF₄ для образования фтортопаза и последующего нагрева до 800–1500 °С для превращения фтортопаза в муллит [40].

Отмечены публикации китайских разработчиков, касающиеся разработки методов получения нитевидных кристаллов оксида алюминия и муллита и изучения

механизмов их роста: изучены гидротермальные методы (Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences) [41–44], метод карботермического восстановления (University Kunming Science and Technology) [45] и термообработки нитевидных прекурсоров (Southwest Jiaotong University) [46], (Wuhan Institute of Technology) [47].

В частности, в Qinghai Institute of Salt Lakes (Chinese Academy of Sciences) разработан метод получения нитевидных кристаллов оксида алюминия из очень дешевого и легкодоступного сырья при относительно низкой температуре [42]. Нитевидные кристаллы Al_2O_3 средней длиной 5 мкм синтезированы из гидротермального раствора. Нитрат алюминия ($\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) и мочевины смешивали и помещали в автоклав из нержавеющей стали с тефлоновой облицовкой и обрабатывали при температуре 120 °С для получения нитевидных кристаллов-прекурсоров $\text{NH}_4\text{Al}(\text{OH})_2\text{CO}_3$ (AACH), которые после промывки и сушки нагревали в печи до 1200 °С с получением нитевидных кристаллов Al_2O_3 .

Нитевидные кристаллы муллита получают из прекурсоров муллита с последующей термообработкой в присутствии катализаторов. При этом разработчики находят способы получения муллитовых нитевидных кристаллов путем переработки отходов, богатых кремнеземом, в условиях низких температур, чтобы максимально снизить стоимость продукта. В частности, в Wuhan Institute of Technology предложен способ получения нитевидных кристаллов оксида алюминия, который включает добавление по каплям геля гидроксида алюминия в раствор фторида аммония для получения нитевидного прекурсора оксида алюминия и обжиг нитевидного прекурсора оксида алюминия в условиях подачи водяного пара с получением нитевидных кристаллов оксида алюминия. Авторы обращают внимание, что благодаря низкой температуре синтеза снижается стоимость продукта, технология проста и экологична [47]. Запатентованные решения вторичной переработки сырья предложены компаниями Shandong University [48] и Zibo Zhongxiao New Materials Co Ltd [49].

В работе [50], выполненной совместно несколькими китайскими вузами, приведены результаты эксперимента по созданию метода получения муллитовых нитевидных кристаллов из отходов производства силиконово-алюминиевого клея. В качестве источника алюминия использовали $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$, в качестве катализаторов кристаллизации были выбраны Na_2SO_4 и $\text{AlF}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$. Исходную смесь подвергали влажному помолу в шаровой мельнице, сушили при 110 °С в течение 12 ч, после чего обжигали в электропечи при температуре 700–1000 °С со скоростью нагрева 5 °С/мин и выдерживали в этом температурном диапазоне в течение 5 ч. Образцы охлаждали естественным путем до комнатной температуры в печи и промывали 5–7 раз деионизированной водой (рис. 5).

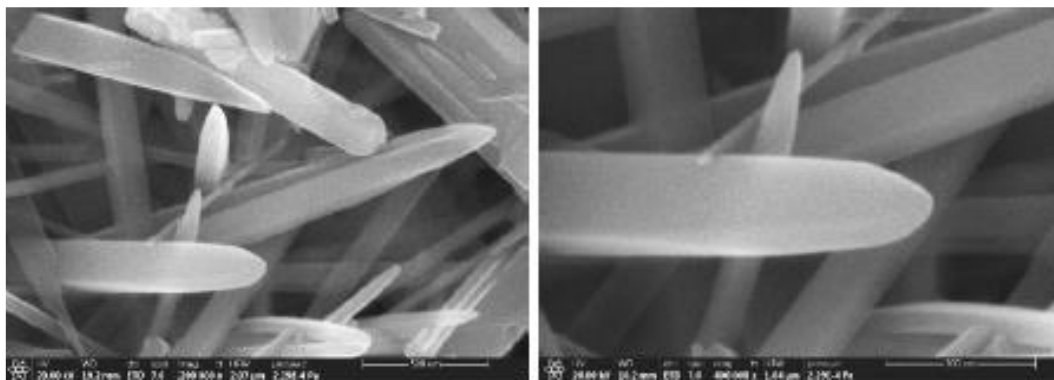


Рис. 5. Муллитовые нитевидные кристаллы (СЭМ), полученные при использовании 10 % сульфата натрия и 5 % $\text{AlF}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, при температуре обжига 825 °С и выдержке 5 ч [50]

Заключения

Изучение научно-технической литературы в области методов получения нитевидных кристаллов тугоплавких соединений показало, что ПЖТ-механизм роста монокристаллических усов, открытый в 1960-е гг., является основным моментом в понимании их образования, однако в 1990-х гг. технология каталитического роста нитевидных кристаллов позволила расширить ассортимент производимых монокристаллов и усовершенствовать процессы их производства. Если в некоторых областях, таких как микроэлектроника, биотехнологии, полупроводники, нитевидные кристаллы уже прочно заняли свое место, то монокристаллические усы муллита и оксида алюминия будут востребованы при производстве керамических и металлических композиционных материалов. Для создания непрерывного процесса получения нитевидных кристаллов оксида алюминия с ростом в определенном кристаллографическом направлении необходимо создание аппаратного оформления и, главное, подбор соответствующей подложки для эпитаксиального роста кристаллов.

Список источников

1. Каблов Е.Н., Антипов В.В. Роль материалов нового поколения в обеспечении технологического суверенитета Российской Федерации // Вестник Российской академии наук. 2023. Т. 93. № 10. С. 907–916.
2. Ерасов В.С., Сибяев И.Г. Схема разработки и оценки свойств конструкционных авиационных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 1 (70). С. 61–81. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.02.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-61-81.
3. Доронин О.Н., Артеменко Н.И., Стехов П.А., Воронов В.А. Нанесение керамических слоев теплозащитных покрытий на основе систем $Gd_2O_3-ZrO_2-HfO_2$ и $Sm_2O_3-Y_2O_3-HfO_2$ // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 3 (68). С. 108–119. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.02.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-108-119.
4. Каблов Е.Н., Щетанов Б.В., Большакова А.Н., Ефимочкин И.Ю., Щербаков Е.Н. Ниобий, армированный волокнами $\alpha-Al_2O_3$. Часть 1. Двухкомпонентные композиции // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 3 (64). С. 58–77. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.02.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-58-77.
5. Дубровский В.Г., Цырлин Г.Э. Полупроводниковые нитевидные кристаллы: рост, физические свойства и приложения. Учебное издание. СПб.: Ун-т ИТМО, 2019. 128 с.
6. Козенков О.Д., Сычев И.В., Санников В.Г. Лабораторная технология роста нитевидных кристаллов кремния для датчиков радиотехнических систем // Вестник Воронежского института МВД России. 2022. № 4. С. 152–159.
7. Сидоров Д.В., Грунин А.А., Шавнев А.А. Реализация технологии химического газофазного осаждения карбида кремния в электронике. Часть 1 // Труды ВИАМ. 2024. № 3 (133). С. 101–116. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.02.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-3-101-116.
8. Петрушин Н.В., Елютин Е.С., Чабина Е.Б. Фазовые и структурные превращения при направленной кристаллизации с плоским фронтом интерметаллидных эвтектических сплавов на основе никеля // Труды ВИАМ. 2020. № 3 (87). С. 13–29. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.03.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-13-29.
9. Способ выращивания нитевидных кристаллов кремния: пат. 2550732 Рос. Федерация; заявл. 29.06.20; опубл. 01.07.21.
10. Бабашов В.Г., Варрик Н.М., Карасева Т.А. О возможности получения нитевидных кристаллов нитрида титана из газовой фазы // Стекло и керамика. 2021. Т. 94. № 5. С. 19–25.
11. Бабашов В.Г., Варрик Н.М., Карасева Т.А. Получение нитевидных кристаллов нитрида титана из газовой фазы // Стекло и керамика. 2021. Т. 94. № 1. С. 12–21.

12. Abramov D.V., Arakelian S.M., Kochuyev D.A. et al. Laser synthesis of metal oxide crystals with the use of carbon nanotubes // *Open Journal of Composite Materials*. 2013. Vol. 3. P. 16–20. DOI: 10.4236/ojcm.2013.32A003.
13. Yu P.-C., Yang R.-J., Tsai Y.-Y. et al. Growth mechanism of single-crystal α -Al₂O₃ nanofibers fabricated by electrospinning techniques // *Journal of the European Ceramic Society*. 2011. Vol. 31. No. 5. P. 723–731.
14. DeVries R.C., Sears G.W. Growth of aluminum oxide whiskers by vapor deposition // *The Journal of Chemical Physics*. 1959. Vol. 31. No. 5. P. 1256–1257.
15. Sears G.W. Mercury Whiskers // *Acta Metallurgica*. 1953. Vol. 1. No. 4. P. 457–459.
16. Wagner R.S., Ellis W.C. Vapor-liquid-solid mechanism of single crystal growth // *Applied Physics Letters*. 1964. Vol. 4. No. 5. P. 89–90. DOI: 10.1063/1.1753975.
17. Wagner R.S., Ellis W.C. Vapor-liquid-solid mechanism of single crystal growth and its application to silicon // *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*. 1965. Vol. 233. P. 1053–1064.
18. Туманов А.Т., Портной К.И., Грибков В.Н. и др. Кинетика осевого роста нитевидных кристаллов карбида кремния // *Доклады Академии наук СССР. Сер.: Кристаллография*. 1974. Т. 218. № 5. С. 1089–1092.
19. Schwoebel R.L. A diffusion model for filamentary crystal growth // *Journal Applied Physics*. 1967. Vol. 38. No. 4. P. 1759–1765.
20. Монокристалльные волокна и армированные ими материалы: сб. тр. / пер. Б.Г. Арабея, Е.И. Гиваргизова, С.Т. Милейко; под ред. А.Т. Туманова. М.: Мир, 1973. 464 с.
21. Грибков В.Н., Исайкин А.С., Уманцев Э.Л., Щетанов Б.В. Рост усов α -Al₂O₃ при окислении алюминия // *Известия Академии наук СССР. Сер.: Неорганические материалы*. 1972. Т. 8. № 7. С. 1249–1253.
22. Щетанов Б.В., Грибков В.Н., Исайкин А.С., Силаев В.А. Выращивание нитевидных кристаллов α -Al₂O₃ по механизму пар – жидкость – твердая фаза // *Порошковая металлургия*. 1972. № 4. С. 12–15.
23. Щетанов Б.В., Исайкин А.С., Грибков В.Н. и др. Рост нитевидных кристаллов окси алюминия при восстановлении окси алюминия // *Физика и химия обработки материалов*. 1973. № 1. С. 112–119.
24. Способ получения нитевидных кристаллов α -окси алюминия: а.с. 404502 СССР; заявл. 03.10.69; опубл. 22.10.73.
25. Грибков В.Н., Исайкин А.С., Портной К.И. и др. Методы получения нитевидных кристаллов тугоплавких соединений // *Материалы Второй Всесоюз. конф. «Композиционные металлические материалы»* / под ред. А.Т. Туманова, К.И. Портного. М., 1971. С. 159–176.
26. Yang P., Yan R., Fardy M. Semiconductor nanowire: What's next? // *Nano Letters*. 2010. Vol. 10. No. 5. P. 1529–1536.
27. Небольсин В.А. Исторический взгляд на механизм роста нитевидных кристаллов пар – жидкость – кристалл: историография проблемы // *Bulletin Social-Economic and Humanitarian Research*. 2025. Vol. 25 (27). P. 49–65.
28. Небольсин В.А., Воробьев А.Ю., Swaikat N. Новое понимание механизма роста нитевидных нанокристаллов пар – жидкая капля – кристалл // *Неорганические материалы*. 2020. Т. 56. № 4. С. 364–370.
29. Webb W.W., Forgend W.D. Growth and defect structure of sapphire microcrystals // *Journal Applied Physics*. 1957. Vol. 28. No. 12. P. 1449–1454.
30. Process for preparing virtually perfect alumina crystals: pat. 3011870 US; appl. 05.09.58; publ. 05.12.61.
31. Improvements in or relating to productions of alumina whiskers: pat. 1188662 GB; appl. 04.11.66; publ. 22.04.70.
32. Иванов Д.А., Ситников А.И., Шляпин С.Д. Дисперсноупрочненные волокнистые и слоистые неорганические композиционные материалы: учеб. пособие для студентов вузов / под ред. А.А. Ильина. М.: Московск. гос. индустриальный ун-т, 2010. 228 с.
33. Process for producing α -alumina whiskers: pat. 3505014 US; appl. 02.05.69; publ. 07.04.70.
34. Productions of α -alumina whiskers: pat. 1189632; appl. 12.06.66; publ. 29.04.70.
35. Apparatus for growing whiskers: pat. 3147085 US; appl. 14.09.61; publ. 01.09.64.

36. Process for preparing virtually perfect alumina crystals: pat. 3011870 US; appl. 05.09.58; publ. 05.12.61.
37. Preparation of sapphire fibers: pat. 3077380 US; appl. 24.07.59; publ. 12.02.63.
38. Method of growing alpha-alumina and beta-silicon carbide whiskers: pat. 3409395 US; appl. 05.04.65; publ. 05.11.68.
39. Production of a form of alumina whiskers: pat. 3947562 US; appl. 04.04.75; publ. 30.03.76.
40. Preparation and use of mullite whiskers networks: pat. 9211219 WO; appl. 13.12.91; publ. 09.07.92.
41. Gong W., Li X.-C., Zhu B.-Q. Modeling and Synthesis of Alumina Whiskers Based on the Vapor Deposition Process // *Materials*. 2017. Vol. 10 (10). Art. 1192. DOI: 10.3390/ma10101192.
42. Li J., Li W., Nai X. et al. Synthesis and formation of alumina whiskers from hydrothermal solution // *Journal of Material Sciences*. 2010. Vol. 45. P. 177–181.
43. Hydrothermal preparation method for aluminum oxide whiskers at low temperature: pat. 101338448 CN; appl. 12.08.08; publ. 07.01.09.
44. Process for producing aluminum oxide crystal whisker: pat. 101109106 CN; appl. 25.07.07; publ. 23.01.08.
45. Method of preparing alpha-Al₂O₃ crystal whisker by carbothermal reduction: pat. 101974782 CN; appl. 19.11.10; publ. 16.02.11.
46. Method for preparing alumina whiskers by controlling atmosphere: pat. 108130595A CN; appl. 22.12.17; publ. 08.06.18.
47. Preparation method of aluminum oxide whiskers: pat. 110904494 CN; appl. 20.12.19; publ. 24.03.20.
48. Preparation method of mullite whiskers: pat. 1303037 CN; №200510044907; appl. 18.10.05; publ. 07.03.07.
49. Preparation method of mullite whiskers: pat. 115216829 CN; appl. 07.07.22; publ. 21.10.22.
50. Gu X., Chen P., Wang T. et al. Analysis of Influencing Factors in the Preparation of Mullite Whiskers from Recovering Silicon-Rich Waste under Low-Temperature Conditions // *Nanomaterials*. 2023. Vol. 13. Art. 1143. DOI: 10.3390/nano13071143.

References

1. Kablov E.N., Antipov V.V. The role of new generation materials in ensuring the technological sovereignty of the Russian Federation. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2023, vol. 93, no. 10, pp. 907–916.
2. Erasov V.S., Sibayev I.G. Scheme for the development and evaluation of properties of structural aviation composite materials. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), pp. 61–81. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: February 10, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-61-81.
3. Doronin O.N., Artemenko N.I., Stekhov P.A., Voronov V.A. Deposition of ceramic layers of heat protection coatings based on the system Gd₂O₃–ZrO₂–HfO₂ and Sm₂O₃–Y₂O₃–HfO₂. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 3 (68), pp. 108–119. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: February 10, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-108-119.
4. Kablov E.N., Shchetanov B.V., Bolshakova A.N., Efimochkin I.Yu., Shcherbakov E.M. Niobium reinforced by α-Al₂O₃ fibers. Part 1. Two-Component Compositions. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 3 (64), pp. 58–77. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: February 10, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-58-77.
5. Dubrovsky V.G., Tsyrlin G.E. *Semiconductor whiskers: growth, physical properties, and applications*: Study guide. St. Petersburg: ITMO University, 2019, 128 p.
6. Kozenkov O.D., Sychev I.V., Sannikov V.G. Laboratory technology for growing silicon whiskers for sensors in radio engineering systems. *Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii*, 2022, no. 4, pp. 152–159.
7. Sidorov D.V., Grunin A.A., Schavnev A.A. Implementation of technology for chemical vapor deposition of silicon carbide in electronics. Part 1. *Trudy VIAM*, 2024, no. 3 (133), pp. 101–116. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 10, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-3-101-116.

8. Petrushin N.V., Elyutin E.S., Chabina E.B. Phase and structural transformations in directionally solidified with plant front intermetallic eutectic Ni-based alloys. *Trudy VIAM*, 2020, no. 3 (87), pp. 13–29. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 18, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-13-29.
9. *Method for growing silicon whiskers*: pat. 2550732 Rus. Federation; appl. 29.06.20; publ. 01.07.21.
10. Babashov V.G., Varrik N.M., Karaseva T.A. On the possibility of obtaining titanium nitride whiskers from the gas phase. *Steklo i keramika*, 2021, vol. 94, no. 5, pp. 19–25.
11. Babashov V.G., Varrik N.M., Karaseva T.A. Obtaining titanium nitride whiskers from the gas phase. *Steklo i keramika*, 2021, vol. 94, no. 1, pp. 12–21.
12. Abramov D.V., Arakelian S.M., Kochuyev D.A. et al. Laser synthesis of metal oxide crystals with the use of carbon nanotubes. *Open Journal of Composite Materials*, 2013, vol. 3, pp. 16–20. DOI: 10.4236/ojcm.2013.32A003.
13. Yu P.-C., Yang R.-J., Tsai Y.-Y. et al. Growth mechanism of single-crystal α -Al₂O₃ nanofibers fabricated by electrospinning techniques. *Journal of the European Ceramic Society*, 2011, vol. 31, no. 5, pp. 723–731.
14. DeVries R.C., Sears G.W. Growth of aluminum oxide whiskers by vapor deposition. *The Journal of Chemical Physics*, 1959, vol. 31, no. 5, pp. 1256–1257.
15. Sears G.W. Mercury Whiskers. *Acta Metallurgica*, 1953, vol. 1, no. 4, pp. 457–459.
16. Wagner R.S., Ellis W.C. Vapor-liquid-solid mechanism of single crystal growth. *Applied Physics Letters*, 1964, vol. 4, no. 5, pp. 89–90. DOI: 10.1063/1.1753975.
17. Wagner R.S., Ellis W.C. Vapor-liquid-solid mechanism of single crystal growth and its application to silicon. *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*, 1965, vol. 233, pp. 1053–1064.
18. Tumanov A.T., Portnoy K.I., Gribkov V.N. et al. Kinetics of axial growth of silicon carbide whiskers. *Doklady Akademii nauk SSSR. Ser.: Kristallografiya*, 1974, vol. 218, no. 5, pp. 1089–1092.
19. Schwoebel R.L. A diffusion model for filamentary crystal growth. *Journal Applied Physics*, 1967, vol. 38, no. 4, pp. 1759–1765.
20. *Single-crystal fibers and materials reinforced with them*: Coll. Works. Ed. A.T. Tumanov. Moscow: Mir, 1973, 464 p.
21. Gribkov V.N., Isaikin A.S., Umancev E.L., Shchetanov B.V. Growth of α -Al₂O₃ whiskers during aluminum oxidation. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Ser.: Neorganicheskiye materialy*, 1972, vol. 8, no. 7, pp. 1249–1253.
22. Shchetanov B.V., Gribkov V.N., Isaikin A.S., Silaev V.A. Growing α -Al₂O₃ whiskers by the vapor–liquid–solid mechanism. *Poroshkovaya metallurgiya*, 1972, no. 4, pp. 12–15.
23. Shchetanov B.V., Isaikin A.S., Gribkov V.N. et al. Growth of aluminum oxide whiskers during aluminum oxide reduction. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*, 1973, no. 1, pp. 112–119.
24. *Method for producing α -aluminum oxide whiskers*: a.s. 404502 USSR; appl. 03.10.69; publ. 22.10.73.
25. Gribkov V.N., Isaikin A.S., Portnoy K.I. et al. Methods for obtaining whiskers of refractory compounds. *Proceedings of the Second All-Union Conf. «Composite Metallic Materials»*. Ed. A.T. Tumanov, K.I. Portnoy. Moscow, 1971, pp. 159–176.
26. Yang P., Yan R., Fardy M. Semiconductor nanowire: What's next? *Nano Letters*, 2010, vol. 10, no. 5, pp. 1529–1536.
27. Nebolsin V.A. Historical view on the growth mechanism of whisker crystals vapor-liquid-crystal: historiography of the problem. *Bulletin Social-Economic and Humanitarian Research*, 2025, vol. 25 (27), pp. 49–65.
28. Nebolsin V.A., Vorobyov A.Yu., Swaikat N. New understanding of the growth mechanism of vapor-liquid droplet-crystal nanowires. *Neorganicheskiye materialy*, 2020, vol. 56, no. 4, pp. 364–370.
29. Webb W.W., Forgend W.D. Growth and defect structure of sapphire microcrystals. *Journal Applied Physics*, 1957, vol. 28, no. 12, pp. 1449–1454.
30. *Process for preparing virtually perfect alumina crystals*: pat. 3011870 US; appl. 05.09.58; publ. 05.12.61.

31. *Improvements in or relating to productions of alumina whiskers*: pat. 1188662 GB; appl. 04.11.66; publ. 22.04.70.
32. Ivanov D.A., Sitnikov A.I., Shlyapin S.D. *Dispersion-strengthened fibrous and layered inorganic composite materials*: a textbook for university students. Ed. A.A. Ilyin. Moscow: Moscow State Industrial Univ., 2010, 228 p.
33. *Process for producing α -alumina whiskers*: pat. 3505014 US; appl. 02.05.69; publ. 07.04.70.
34. *Productions of α -alumina whiskers*: pat. 1189632; appl. 12.06.66; publ. 29.04.70.
35. *Apparatus for growing whiskers*: pat. 3147085 US; appl. 14.09.61; publ. 01.09.64.
36. *Process for preparing virtually perfect alumina crystals*: pat. 3011870 US; appl. 05.09.58; publ. 05.12.61.
37. *Preparation of sapphire fibers*: pat. 3077380 US; appl. 24.07.59; publ. 12.02.63.
38. *Method of growing alpha-alumina and beta-silicon carbide whiskers*: pat. 3409395 US; appl. 05.04.65; publ. 05.11.68.
39. *Production of a form of alumina whiskers*: pat. 3947562 US; appl. 04.04.75; publ. 30.03.76.
40. *Preparation and use of mullite whiskers networks*: pat. 9211219 WO; appl. 13.12.91; publ. 09.07.92.
41. Gong W., Li X.-C., Zhu B.-Q. Modeling and Synthesis of Alumina Whiskers Based on the Vapor Deposition Process. *Materials*, 2017, vol. 10 (10), art. 1192. DOI: 10.3390/ma10101192.
42. Li J., Li W., Nai X. et al. Synthesis and formation of alumina whiskers from hydrothermal solution. *Journal of Material Sciences*, 2010, vol. 45, pp. 177–181.
43. *Hydrothermal preparation method for aluminum oxide whiskers at low temperature*: pat. 101338448 CN; appl. 12.08.08; publ. 07.01.09.
44. *Process for producing aluminum oxide crystal whisker*: pat. 101109106 CN; appl. 25.07.07; publ. 23.01.08.
45. *Method of preparing alpha- Al_2O_3 crystal whisker by carbothermal reduction*: pat. 101974782 CN; appl. 19.11.10; publ. 16.02.11.
46. *Method for preparing alumina whiskers by controlling atmosphere*: pat. 108130595A CN; appl. 22.12.17; publ. 08.06.18.
47. *Preparation method of aluminum oxide whiskers*: pat. 110904494 CN; appl. 20.12.19; publ. 24.03.20.
48. *Preparation method of mullite whiskers*: pat. 1303037 CN; №200510044907; appl. 18.10.05; publ. 07.03.07.
49. *Preparation method of mullite whiskers*: pat. 115216829 CN; appl. 07.07.22; publ. 21.10.22.
50. Gu X., Chen P., Wang T. et al. Analysis of Influencing Factors in the Preparation of Mullite Whiskers from Recovering Silicon-Rich Waste under Low-Temperature Conditions. *Nanomaterials*, 2023, vol. 13, art. 1143. DOI: 10.3390/nano13071143.

Информация об авторах

Бабашов Владимир Георгиевич, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Викулин Владимир Васильевич, помощник генерального директора по науке, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Варрик Наталья Мироновна, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Карасева Татьяна Александровна, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Vladimir G. Babashov, Head of the Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Vladimir V. Vikulin, Assistant to the General Director for Science, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Natalia M. Varrik, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Tatiana A. Karaseva, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 03.04.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 14.04.2026.

The article was submitted 03.04.2026; approved and accepted for publication after reviewing 14.04.2026.