

КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ПРОДУКТЫ СГОРАНИЯ В ВОЗДУХЕ НАНОПОРОШКА АЛЮМИНИЯ ПРИ ДЕЙСТВИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

А.П. Ильин, А.В. Мостовщиков

Томский политехнический университет

E-mail: pasembellum@mail.ru

Исследована микроструктура микрокристаллических продуктов сгорания нанопорошка алюминия в воздухе и влияние на их структуру постоянного магнитного поля. Установлено, что продуктами сгорания свободно насыпанного нанопорошка алюминия являются двухуровневые нитевидные кристаллы. В условиях горения в воздухе в однородном магнитном поле формируются монокристаллы гексагональной формы, а в случае неоднородного магнитного поля образуются ограненные кристаллы вытянутой формы микронных размеров. Формирование продуктов вытянутой структуры объясняется массопереносом продуктов горения в направлении тепловых потоков. Упорядоченные шестигранные кристаллические структуры, вероятно, образуются за счёт перегрева продуктов окисления при действии магнитного поля и повышения подвижности их структурных единиц в тепловой волне кристаллизации. Формирование ограненных кристаллов, согласно электронной микроскопии, возможно при оптимальных размерах частиц продуктов сгорания.

Ключевые слова:

Нанопорошок алюминия, нитрид алюминия, монокристаллы, магнитное поле, массоперенос, сжигание, окисление, переход, перенос фазы.

Key words:

Aluminum nanopowder, aluminum nitride, monocrystals, magnetic field, mass transfer, combustion, oxidation, pass, phase transition.

Введение

Нанопорошок алюминия представляет собой совокупность сферических частиц, распределение которых близко к нормально-логарифмическому с максимумом 120 нм. В пассивированном малыми добавками воздуха нанопорошке алюминия содержание металлического алюминия составляет 88 мас. %, содержание оксидов и гидрооксидов максимально достигает 6 мас. %, общее содержание ад- и абсорбированных газов составляет около 6 мас. %. При этом содержание металлических примесей (железо, марганец, медь) не превышает 0,3 мас. %. Насыпная плотность исследуемого образца нанопорошка алюминия равна 0,2 г/см³. Горение нанопорошка алюминия легко инициируется с помощью нагретой электрическим током нихромовой спирали, и его горение протекает в две стадии [1]. В процессе горения на второй стадии происходит формирование кристаллической фазы нитрида алюминия (более 30 мас. %) [2]. Не пассивированный нанопорошок алюминия, полученный с помощью электрического взрыва проводников в аргоне [3], пирофорен и при нагревании взаимодействует практически со всеми известными веществами.

Согласно существующим представлениям [4], формирование самостоятельной кристаллической фазы нитрида алюминия предполагает взаимодействие алюминия только с азотом, в определенном объеме в течение короткого времени в присутствии кислорода. Стабилизация нитрида может быть связана с кинетическим торможением диффузии кислорода через слой нитрида: термодинамически разрешенного процесса окисления нитрида алюминия кислородом воздуха. Ранее выполненные термодинамические расчеты показали [5], что нитрид алюминия может образовываться в качестве

промежуточного продукта при горении порошкообразного алюминия, но он должен доокисляться кислородом воздуха и не сохраняться в конечных продуктах [6].

Процесс формирования нитрида алюминия при горении в воздухе является неравновесным и протекает в условиях теплового взрыва, поэтому интерес представляло изучить фазообразование продуктов сгорания под влиянием внешнего воздействия.

Целью работы являлось экспериментальное обоснование образования кристаллических фаз нитрида алюминия различной микрокристаллической структуры в условиях теплового взрыва без внешнего воздействия и в постоянном магнитном поле.

Формирование нитевидных кристаллов AlN

Процесс горения свободно насыпанного нанопорошка алюминия в виде конусообразного образца протекал в две стадии в режиме теплового взрыва. В этих условиях нитрид алюминия образовывался в виде нитевидных кристаллов (вискеров), причем процесс горения на второй высокотемпературной стадии сопровождался колебательными процессами, что отражалось на понижении-повышении скорости прироста массы, и характеризовался соответствующими температурными колебаниями (± 200 °C) [7]. Благодаря температурным колебаниям в работе [8] были получены двухуровневые нитевидные кристаллы.

С увеличением массы навески температура сгорания нанопорошка алюминия возрастала. Тем не менее, при сжигании достаточно большого количества образцов нанопорошка алюминия (даже при массе образца 15 г) в воздухе не было обнаружено ограненных продуктов сгорания, основную их до-

лю составляли тонкие нитевидные кристаллы, состоявшие из нанокристаллитов толщиной менее 100 нм и длиной до 30 мкм (рис. 1, масса образца 5 г, коническая форма сжигаемого образца).

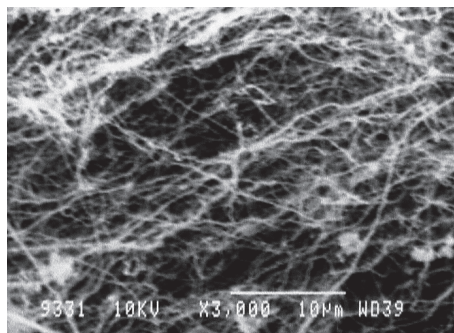


Рис. 1. Микрофотография продуктов сгорания нанопорошка алюминия в воздухе без внешних воздействий

Таким образом, повышенная температура при горении не является фактором, обеспечивающим образование монокристаллов нитрида алюминия. Согласно микрофотографии (рис. 1), нитевидные кристаллы ориентированы в направлении тепловых потоков и массопереноса при горении.

Формирование продуктов при горении нанопорошка алюминия в однородном магнитном поле

Для исследования влияния температуры на формирование продуктов сгорания нанопорошок алюминия помещали в алундовые тигли объемом 20 см³. Это способствовало формированию направления теплоотвода от поверхности горящего образца преимущественно в вертикальном направлении – вдоль восходящего конвективного потока воздуха, нагретого поверхностью горящего образца. В то же время горение в тигле способствовало сохранению тепла внутри тигля. При сжигании нанопорошка алюминия в этих условиях (рис. 2) конечные продукты представляли собой неограниченные кристаллиты с характерными размерами от 1 до 5–8 мкм.

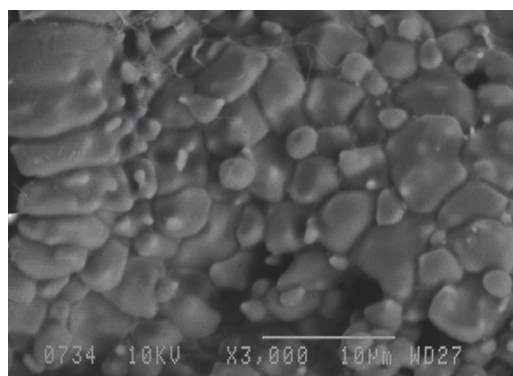


Рис. 2. Микрофотография продуктов сгорания нанопорошка алюминия в алундовом тигле без воздействия магнитного поля

При этом кристаллиты разделены поверхностью раздела, и лишь у небольшого количества имелись признаки начала формирования кристал-

лической структуры. При горении нанопорошка алюминия в однородном постоянном магнитном поле (напряженностью 1500 эрстед) в открытом алундовом тигле в условиях теплового взрыва в атмосфере воздуха были синтезированы монокристаллы нитрида алюминия гексагонального габитуса (рис. 3) [9].

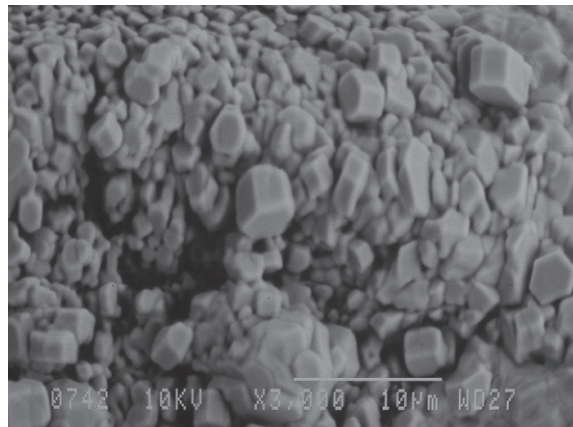


Рис. 3. Микрофотография продуктов сгорания нанопорошка алюминия в алундовом тигле при воздействии однородного магнитного поля

Согласно полученным экспериментальным данным, шестигранные монокристаллы хорошо окристаллизованы и имеют характерный размер 2–4 мкм. В то же время на микрофотографии отсутствуют ограненные кристаллы, размер которых составляет менее 1 мкм. Для больших агломератов также не наблюдается формирование ограненных кристаллов (рис. 3).

Таким образом, повышение температуры сгорания (в тигле) без внешнего воздействия не привело к формированию ограненных структур. В то же время одновременное действие высокой температуры и однородного постоянного магнитного поля способствовало кристаллизации нитрида алюминия и формированию монокристаллов гексагонального габитуса.

Продукты сгорания нанопорошка алюминия в неоднородном магнитном поле

Для проверки влияния внешних факторов (магнитного поля, температуры и т. п.) на процесс кристаллизации продуктов сгорания образцы нанопорошка алюминия сжигали на керамической подложке между двумя магнитами. В этом случае для создания неоднородного магнитного поля в работе использовали систему из двух постоянных магнитов Fe-Nd-B (напряженность поля 1800 эрстед), разделенных воздушным зазором 50 мм. Для придания конструкции механической прочности притягивающиеся магниты были разделены двумя вставками из диэлектрического материала. Первый образец в свободно насыпанном виде в форме конусообразной навески размещали между магнитами и инициировали процесс горения. При этом конечные продукты представляли собой многоуровневые ориентированные вис커еры, напра-

вленные в различных направлениях, исходящих из нескольких центров (рис. 4).

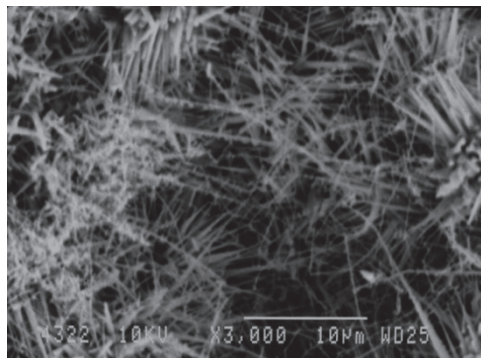


Рис. 4. Микрофотография продуктов сгорания свободно насыпанного нанопорошка алюминия при воздействии неоднородного магнитного поля

Вероятно, на процесс формирования нитевидных кристаллов оказали сильное влияние потоки, связанные с переносом массы и тепла.

При сжигании нанопорошка алюминия в алундовом тигле, помещенном в неоднородное магнитное поле, происходило формирование вытянутых ограниченных кристаллов нитрида алюминия (рис. 5).

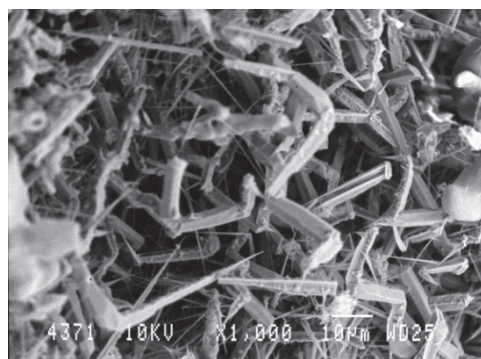


Рис. 5. Микрофотография продуктов сгорания нанопорошка алюминия в алундовом тигле при воздействии неоднородного магнитного поля

Монокристаллы имели изогнутую форму и состояли из нескольких линейных участков. Диаметр этих кристаллов составлял 4 мкм, а длина линейной части кристалла – 16 мкм.

Более тонкие кристаллы (диаметром менее 1 мкм) не имеют огранки. Зависимость степени ограниченности микрокристаллов можно проследить на рис. 5: игольчатый кристалл по мере увеличения его толщины приобретает огранку и при толщине около 4 мкм принимает окончательную шестигранную форму.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильин А.П., Проскуровская Л.Т. Двухстадийное горение ультрадисперсного порошка алюминия на воздухе // Физика горения и взрыва. – 1990. – Т. 26. – № 2. – С. 71–72.
2. Ильин А.П., Громов А.А. Горение алюминия и бора в сверхтонком состоянии. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002. – 154 с.

Заключение

Таким образом, продуктами сгорания свободно насыпанного нанопорошка алюминия в воздухе (без действия магнитного поля) являются нитевидные кристаллы (рис. 1) [7]; при сгорании нанопорошка алюминия в алундовом тигле (без действия магнитного поля) получают неограниченные кристаллиты (рис. 2). При воздействии магнитным полем на горящий образец нанопорошка алюминия формируются кристаллы различного габитуса в зависимости от условий теплоотвода (тигель или конический образец на подложке) и от конфигурации магнитного поля (однородное или неоднородное). При сгорании в тигле в однородном магнитном поле формируются кристаллы с преимущественно гексагональной огранкой (рис. 3); при сгорании свободно насыпанной конической навески нанопорошка алюминия в неоднородном магнитном поле формируются многоуровневые ориентированные вискеры, направленные в различных направлениях, исходящих из нескольких центров (рис. 4); при сгорании в тигле в неоднородном магнитном поле происходит формирование вытянутых ограниченных кристаллов нитрида алюминия с характерной линейной частью 16 мкм (рис. 5).

Наиболее вероятно, магнитное поле способствует сохранению ориентации кристаллов продуктов сгорания и их стабилизации в неокристаллизованном состоянии, что приводит к переохлаждению. В однородном магнитном поле процесс кристаллизации, протекающий в тепловой волне и обусловленный выделением энергии, сопровождается переходом неупорядоченных структур в монокристаллы AlN. В неоднородном магнитном поле процесс кристаллизации после переохлаждения также приводит к тепловой волне, которая распространяется по линейно вытянутым структурам продуктов. При достижении длины прохождения волны 16 мкм и толщине 4 мкм энергия, накопленная при кристаллизации, достаточна для окристаллизации в другом направлении, что связано с высокой подвижностью структурных единиц. Согласно электронной микроскопии (рис. 5), при меньшей толщине структурного фрагмента выделившегося при кристаллизации тепла недостаточно для предания ему кристаллической огранки, и линейный рост кристалла вырождается в линейный (без изгибов) вискер.

Выполнено при частичной финансовой поддержке проекта № 3.3055.2011 Разработка научных основ получения наноструктурированных неорганических и органических материалов.

3. Назаренко О.Б. Электровзрывные нанопорошки: получение, свойства, применение / под ред. А.П. Ильина. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 148 с.
4. Ильин А.П., Громов А.А., Толбанова Л.О. Явление химического связывания азота воздуха с образованием кристаллических фаз нитридов при горении порошкообразных металлов, бора и

- кремния // *Фундаментальные исследования*. – 2008. – № 4. – С. 13–18.
5. Боборыкин В.М., Гремячкин В.М., Истратов А.Г. и др. О влиянии азота на горение алюминия // *Физика горения и взрыва*. – 1983. – № 3. – С. 22–29.
 6. Роот Л.О., Сморгина К.С., Звягинцева Е.С., Ильин А.П. Каталитическое действие добавок оксида хрома (III) на процесс горения нанопорошка алюминия в воздухе // *Известия Томского политехнического университета*. – 2012. – Т. 320. – № 3. – С. 5–9.
 7. Ильин А.П., Толбанова Л.О., Мостовщиков А.В. Состав промежуточных продуктов горения нанопорошка алюминия в воздухе // *Известия Томского политехнического университета*. – 2008. – Т. 313. – № 3. – С. 19–24.
 8. Ильин А.П., Толбанова Л.О. Формирование нитевидных кристаллов в промежуточных продуктах горения в воздухе нанопорошка алюминия и его смесей с нанопорошками молибдена и вольфрама // *Известия Томского политехнического университета*. – 2007. – Т. 310. – № 2. – С. 77–80.
 9. Ильин А.П., Мостовщиков А.В., Толбанова Л.О. Рост монокристаллов нитрида алюминия в условиях теплового взрыва // *Письма в ЖТФ*. – 2011. – Т. 37. – Вып. 20. – С. 49–53.

Поступила 19.12.2012 г.

УДК 621.762.3

ВЛИЯНИЕ РАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА АНТИФРИКЦИОННОГО СПЛАВА Al-40Sn

А.Л. Скоренцев*, Н.М. Русин*, Е.А. Колубаев*.*

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск

**Томский политехнический университет

E-mail: skoralexan@mail.ru; rusinnm@mail.ru; eak@ispms.tsc.ru

Исследовано влияние равноканального углового прессования на структуру и свойства спеченного сплава Al-40Sn. Было установлено, что в результате деформационной обработки в сплаве формируется слоистая структура, причем толщина прослоек фаз уменьшается с ростом числа прессований. Установлено, что помимо упрочнения Холла–Петча прочность сплава дополнительно повышается вследствие утонения межфазовых прослоек. Обнаружено, что обработка методом равноканального углового прессования уменьшает интенсивность изнашивания исследуемого сплава и практически не влияет на величину его коэффициента трения при сухом трении.

Ключевые слова:

Самосмазывающийся антифрикционный материал, интенсивность изнашивания, интенсивная пластическая деформация.

Key words:

Self-lubrication antifriction material, wear intensity, severe plastic deformation.

Трение твёрдых тел сопровождается износом их поверхностных слоёв, в результате которого меняется форма и геометрические размеры трущихся деталей. В том случае, когда замена или восстановление изношенных деталей обходится слишком дорого, между ними помещают легко заменяемый вкладыш с антифрикционным покрытием, который предохраняет ответственные детали узла трения от прямого механического контакта. Как правило, покрытие гораздо мягче контртела, поэтому в процессе эксплуатации механизма оно изнашивается гораздо быстрее. Продление сроков работоспособности покрытия значительно повышает эффективность используемого агрегата. Следовательно, разработке новых антифрикционных материалов с высокими триботехническими свойствами, а также улучшению свойств известных материалов уделяется большое внимание.

В настоящее время в технике широко используются вкладыши с покрытием из антифрикционных алюминиевых сплавов [1], поскольку составляющий их основу пластичный металл способен выдерживать без разрушения многократные переде-

формации. Однако Al имеет один существенный недостаток – склонен к схватыванию с находящимися с ним в фрикционном контакте металлами при разрушении в месте контакта поверхностной оксидной плёнки. Для того чтобы изолировать образующиеся в местах разрушения оксидной плёнки участки чистой поверхности алюминия, в сплавы вводят вещества, способные размазываться по поверхности трения и образовывать антизадирную плёнку. Наиболее часто для этих целей используют олово (сплавы марки АО). Объёмная доля Sn, особенности распределения его включений по объёму сплава и их форма могут существенно повлиять на процесс формирования и качество антизадирной плёнки.

Объёмное содержание олова в алюминиевых отливках обычно ограничивают 10 % из-за опасности формирования по границам зёрен непрерывной сетки из мягкого Sn. При наличии такой сетки напряжение течения сплава и его пластичность резко снижаются по причине локализации деформации в прослойках мягкой фазы. Избежать образования оловянной сетки в литых алюминиевых