

УДК 548.4:538.91:66-91

ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ ФУЛЛЕРЕНОПОДОБНЫХ МИКРОЧАСТИЦ МЕДИ

© 2020 г. А. А. Викарчук¹, *, Н. Н. Грызунова¹, А. Г. Денисова¹, М. Н. Тюрков¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Тольяттинский государственный университет”, Тольятти, Россия

*E-mail: fti@tltu.ru

Поступила в редакцию 18.02.2020 г.

После доработки 16.03.2020 г.

Принята к публикации 27.03.2020 г.

Фуллереноподобные микрочастицы меди выращены впервые, они имеют 6 осей симметрии пятого порядка, 60 вершин, огранены 32 гранями в виде шестиугольников и пятиугольников, содержат частичные дисклинации и обладают большой запасенной в объеме упругой энергией. В работе исследована гетерогенная структура частиц, предложена дисклинационная модель их строения, описана их трансформация в процессе роста.

DOI: 10.31857/S0367676520070327

ВВЕДЕНИЕ

Все металлические материалы в зависимости от структуры (вида электронограмм), свойств, поведения в температурных и силовых полях и др. делятся на классы (рис. 1а): кристаллические, аморфные (К. Судзуки), аморфно-кристаллические (А.М. Глезер), нанокристаллические (Г. Глейтер) и квазикристаллические (Д. Шехтман). Эти материалы нашли широкое применение в науке, технике и производстве [1–4].

В последние годы появился еще один класс (подкласс) перспективных металлических материалов, обладающих необычной структурой и уникальными свойствами – это принципиально но-

вые материалы в виде пленок, покрытий, слоев, порошков, массивных материалов [5, 6], состоящие из пентагональных кристаллов (ПК) (рис. 1б). Металлические пентагональные кристаллы существенно отличаются от обычных кристаллов, квазикристаллов, нанокристаллов и аморфных металлических сплавов, прежде всего, по структуре, свойствам и виду электронограмм (рис. 1а).

В настоящее время получено и исследовано большое многообразие пентагональных кристаллов на основе металлов, имеющих ГЦК-решетку (Cu, Ni, Ag и др.) [5–7]. Размеры этих кристаллов колеблются в пределах трех порядков от 20–50 нм до 20–50 мкм. Большинство пентагональных кри-

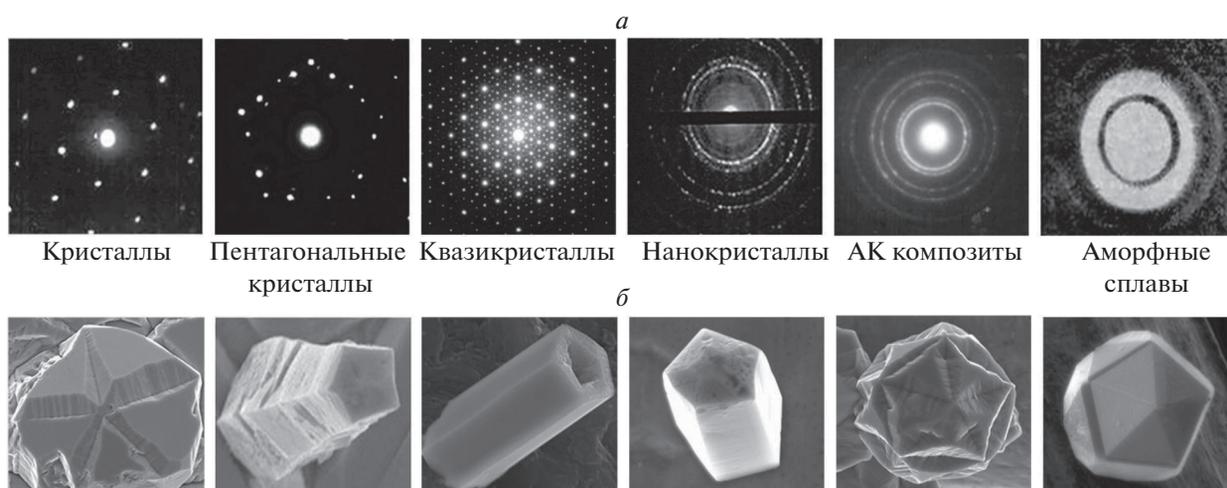


Рис. 1. Деление металлических материалов по виду электронограмм (а) на классы [1–4]; новые материалы (б) на основе пентагональных кристаллов [5, 6]. АК – аморфно-кристаллические.

сталлов выращены методом электроосаждения металла из растворов электролитов, они имеют разнообразную форму: плоские, нитевидные (стержни, вис커еры, усы), конусообразные, пирамидальные, в виде пентагональных призм и трубок, в виде правильных декаэдрических, икосаэдрических частиц, звездчатых пентагональных многогранников и неправильных пентагональных образований (рис. 1б). Все они различаются по размерам, огранке, но имеют ряд общих признаков, которые не характерны для обычных, периодических кристаллов того же химического состава, прежде всего, это:

- вид электронограмм (для пентагональных кристаллов характерны электронограммы, имеющие некристаллографическую пентагональную симметрию, особенно заметную, если их снимать вдоль осей симметрии кристалла (рис. 1а)). Электронограммы от разных участков одного и того же ПК могут иметь различный вид, например, демонстрировать икосаэдрическую симметрию, ГЦК-, ГПУ-решетку или крайне искаженную кристаллическую структуру [5, 8];

- наличие в ПК фрагментов, разделенных между собой двойниковыми границами (рис. 1б);
- наличие в ПК частичных дисклинаций, на которых обрываются двойниковые границы);

- анизотропия структуры и свойств ПК вдоль осей симметрии и других направлений (твердость, прочность, теплопроводность, электропроводность и т.п.);

- низкая объемная плотность и повышенная запасенная в объеме и на поверхности свободная энергия [8];

- специфическая огранка, как правило, ПК огранены кристаллографическими высокоэнергетичными атомными плоскостями (у декаэдрических частиц 10 граней, у икосаэдрических частиц 20 граней, у звездчатых пентагональных кристаллов 90 граней, все они из атомных плоскостей {111}) (рис. 1б);

- необычная, аномальная по сравнению с обычными кристаллами того же химического состава, реакционная и каталитическая способность [5, 9, 10].

ПК отличаются по структуре и свойствам не только от обычных кристаллов, но и от квазикристаллов, которые также обладают осями симметрии пятого порядка [4, 11–13]. Прежде всего, это отличие заметно в характере электронограмм. Электронограммы от квазикристаллов и пентагональных кристаллов могут демонстрировать некристаллическую пентагональную симметрию (рис. 1а), но существенно отличаться друг от друга. Яркость рефлексов на электронограммах квазикристаллов с удалением от центра (места падения электронного луча) практически не меняется, а у ПК, как и у обычных кристаллов, она уменьшается. Квазикристаллы не имеют трансляционной периодичности,

однако при делении образца квазикристалла на части, часть дает такую же дифракционную картину, как и целое (но менее яркую). В ПК это не соблюдается, то есть микродифракция от центра ПК и на периферии разная! Этот экспериментальный факт пока логического объяснения не нашел, но дает основания не объединять квазикристаллы с пентагональными кристаллами, вероятно, это разные подклассы кристаллов (рис. 1а). Кроме того, квазикристаллы, а их сейчас получено около двухсот [4, 11–13], состоят из разных сортов атомов, двух и более, а ПК, в частности наш объект исследования (рис. 2а), состоит только из атомов меди.

Таким образом, объектом исследования в данной работе являются микрочастицы меди в виде усеченного икосаэдра (рис. 2а). Это своеобразные пентагональные кристаллы, имеющие сходство по виду электронограмм и необычной структуре с квазикристаллами (рис. 1а). По внешней форме и огранке (рис. 2а) они похожи на фуллерен C_{60} , обладающий сферическим, жестким каркасом [14, 15], а судя по некоторым механическим характеристикам (микротвердость, пластичность) они не особенно отличаются от обычных периодических кристаллов [5–10].

Исследования особенностей строения и свойств пентагональных микрообъектов, имеющих фуллереноподобную форму и апериодическую структуру квазикристаллов, весьма актуальны. Результаты этих исследований позволят создать принципиально новые материалы, расширить наши представления о строении вещества, дадут информацию о других типах упорядочения атомов в твердом веществе, позволят объяснить, как глобальный ориентационный порядок развивается из локального порядка, выяснить, почему пентагональные кристаллы (рис. 1б, 2а) тесно связаны с понятием “золотого сечения”, характерного только для объектов живой природы [16].

МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ ИКОСАЭДРИЧЕСКИХ МИКРОЧАСТИЦ МЕДИ

Метод электроосаждения материалов из растворов электролитов позволяет получать металлы, сплавы, композиционные материалы в виде покрытий, пленок, фольг, порошков и массивных материалов; позволяет, варьируя технологические параметры электролиза в широком интервале, управлять структурой и свойствами материалов [5, 17]. В частности, этим методом можно менять размер зерна металлических материалов на пять порядков, можно получать кристаллы с пентагональной симметрией в виде плоских, объемных и нитевидных кристаллов, декаэдрических и икосаэдрических частиц [5–10, 18, 19], из которых можно выращивать готовые изделия: микротрубки, кантилеверы, композиционную проволоку, катализаторы и др. [5, 19].

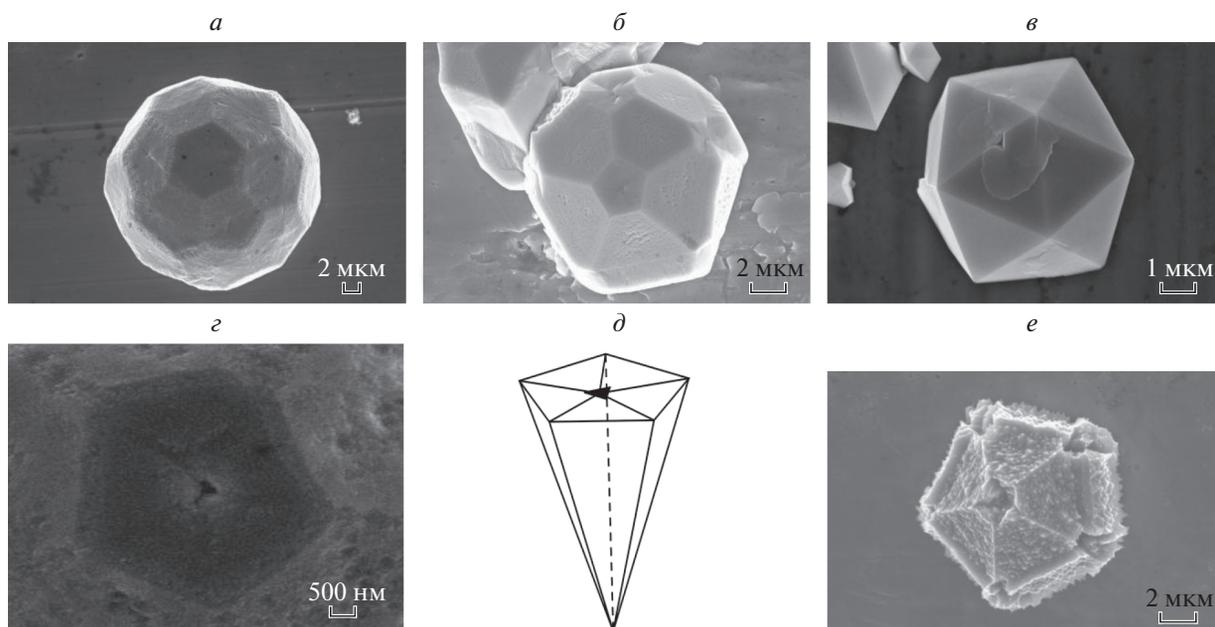


Рис. 2. Микрочастица меди в виде усеченного икосаэдра (*a*), ее трансформация в процессе роста (*б*) в совершенный икосаэдр (*в*), ямки травления — места выхода дисклинаций (*г*, *е*), объемный структурный элемент фуллереноподобной микрочастицы (*д*).

Для получения икосаэдрических частиц меди различной морфологии использовался сернокислый электролит меднения, приготовленный на бидистиллате и содержащий химически чистые реактивы: $250 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1} \text{ CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ и $90 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1} \text{ H}_2\text{SO}_4$. Электроосаждение осуществлялось в потенциостатическом режиме при следующих параметрах: перенапряжение — $85 \pm 5 \text{ мВ}$, время осаждения — от 10 до 20 мин, pH электролита — 1.3–1.4, температура — 20–25°C. Анод был изготовлен из электролитической чистой меди (99.99%), а в качестве катода и одновременно подложки применялась полированная нержавеющая сталь марки 12Х18Н10 или микросетка из нержавеющей стали той же марки.

Исследование морфологии поверхности проводили с использованием сканирующей электронной микроскопии (Carl Zeiss Sigma). Структуру изучали, используя просвечивающий микроскоп Теснаі Osiris, в Центре коллективного пользования Института проблем химической физики Российской академии наук (ИПХФ РАН).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Форма и морфология поверхности частицы

Микрочастицы меди в виде усеченного икосаэдра (УИ), выращенные впервые, имеют 6 осей симметрии 5-го порядка, 60 вершин и 90 ребер (рис. 2*a*), ограничены 32 гранями, 12 из них пятиугольники, а 20 шестиугольники. Внешне они похожи на молекулу фуллерена C_{60} , состоящую из атомов углерода, расположенных на сферической пустотелой по-

верхности [14, 15], однако по размерам микрочастицы больше фуллеренов в тысячи раз, состоят из миллиардов атомов меди и внутри сплошные (рис. 2*a*).

Стабильность фуллеренов определяется правилом изолированного пятиугольника, наиболее стабильны те структуры, которые не имеют смежных пентагонов [20].

Предполагается, что “изгибание” — это один из механизмов уменьшить число нескомпенсированных связей и снизить свободную энергию нанобъекта [21]. Что касается фуллереноподобных медных частиц, имеющих микроразмеры, то такие объекты до сих пор не наблюдались и не исследовались (рис. 2*a*).

Установлено, что поверхность медной микрочастицы в виде УИ, имеющей размеры в интервале от нескольких единиц до 15–20 мкм, ограничена 32 гранями в виде правильных пятиугольников и шестиугольников (рис. 2*a*). Как показали исследования, проведенные методом обратных отраженных электронов, 12 пентагональных граней УИ состоят из кристаллографических плоскостей {110}, а остальные 20 граней — это кристаллографические плоскости {111} [8].

Правильные пентагональные грани, видимые на поверхности УИ, друг с другом не стыкуются, они всегда окружены шестиугольными участками (рис. 2*a*, 2*б*).

Трансформация микрочастицы в виде усеченного икосаэдра в совершенный икосаэдр

В процессе роста при электрокристаллизации меди поверхность микрочастицы в виде УИ суще-

ственно трансформируется (рис. 2а–2в). Форма и размеры его граней меняются, в частности правильные шестиугольники превращаются в неправильные (рис. 2а, 2б).

В центре пентагональных граней на определенном этапе роста частицы появляются ямки травления (рис. 2г, 2д), которые мы связываем с выходом на поверхность УИ и СИ частичных дисклинаций (рис. 2г, 2е). На дисклинациях обрываются 5 двойниковых границ, которые выходят из вершин УИ и СИ (рис. 2а, 2в, 2г, 2е). Пентагональные грани (рис. 2а, 2б, 2г, 2д), на которые выходят дисклинации, имеют преимущественный рост. Плоскости {110} являются вицинальными, они содержат значительную концентрацию террас и ступеней роста (рис. 2б, 2г), обладают повышенной поверхностной энергией [8, 22]. В процессе роста УИ границы раздела, окружающие пентагональные участки, сокращаются и перемещаются (рис. 2б) (вероятно по диффузионному механизму [22], за счет рождающихся при электрокристаллизации и поступающих к ним неравновесных вакансий, концентрации которых достигают значений 10^{-4} [5]). Кристаллические грани из атомных плоскостей {111} трансформируются сначала из правильных шестиугольных (рис. 2а) в неправильные шестиугольные (рис. 2б), затем в треугольные (рис. 2в). Такая трансформация происходит в процессе роста микрочастиц при комнатных температурах и приводит к превращению УИ в СИ (рис. 2а–2в).

Исследования шлифов и внутреннего строения икосаэдрических частиц

Исследования шлифов от СИ и УИ показали (рис. 3а, 3б), что они состоят из объемных конусообразных структурных элементов в форме пентагональных (рис. 2д) и шестигранных пирамид, отделенных друг от друга границами раздела. Если мысленно правильный УИ (рис. 2а) разрезать через середину, то разрез на поверхности пройдет через четыре пятиугольника, четыре шестиугольника и по двум границам раздела шестиугольников. На шлифе (рис. 3б), полученном от средней части УИ после полировки и травления, можно заметить 10 границ, разделяющих микрочастицу на конусообразные фрагменты, сходящиеся в центре. Границы конусообразных фрагментов, из которых состоит УИ (рис. 3б), опираются на ребра шести- и пятиугольников, находящихся на поверхности УИ. Фрагменты чередуются определенным образом (начиная с отмеченной линии, по часовой стрелке: два шестиугольника, граница раздела, пятиугольник и т.д.). Такие шлифы с десятью границами раздела, сходящимися в центре частицы (рис. 3б), возможны только от усеченного икосаэдра.

Электронно-микроскопические исследования икосаэдрических частиц в виде СИ и УИ подтвердили (рис. 3в–3е), что они действительно состоят из

объемных структурных элементов (фрагментов): первый (рис. 2в) – из 20 кристаллических тетраэдров, а второй (рис. 2а) – из пирамид, в основании которых лежат шести- и пятиугольники (рис. 2д).

Для проведения электронно-микроскопических исследований икосаэдрические медные частицы, выращенные по режимам, указанным ранее, сначала закрепляли на сетке из нержавеющей стали путем нанесения на них тонкого слоя тугоплавкого металла (рис. 3в). Затем с помощью ионной пушки проводилась резка микрочастицы, готовились шлифы (рис. 3а, 3б) или фольга, которая электролитически утончалась и исследовалась на просвет (рис. 3г–3е). Исследованиям подвергались правильные усеченные икосаэдры (рис. 2а), совершенные икосаэдры (рис. 2в), но чаще всего икосаэдры, находящиеся на стадии трансформации УИ в СИ (рис. 2б и 3в), эти морфологические фазы присутствуют в медном порошке одновременно.

Электроннограммы от шестиугольных участков демонстрируют ГЦК-решетку (рис. 1а), а пятерные участки УИ – крайне искаженное кристаллическое состояние или пентагональную симметрию (рис. 1а), особенно заметную, если их снимать вдоль осей симметрии микрочастицы. Пятерные участки с дисклинациями не содержат характерных для меди плоских дефектов кристаллического состояния, в частности, двойниковых вставок (рис. 3б).

Кристаллические фрагменты в совершенном и усеченном икосаэдре (в виде треугольных и шестиугольных пирамид) (рис. 2а, 2в) отделены друг от друга двойниковыми границами типа $\langle 112 \rangle$ {111} и имеют субструктуру, содержат в объеме двойниковые прослойки, клиновидные вставки, дислокации и дислокационные конфигурации (рис. 3б, 3г, 3д, 3е). Характерным дефектом структуры икосаэдрических частиц (рис. 2а, 2в) являются стыки оборванных двойниковых и дислокационных границ (рис. 3г, 3д, 3е), последние залегают в плоскостях {112}. Экстинционные контуры (рис. 3г) дислокационного происхождения, выходящие из стыков, свидетельствуют о наличии там значительных полей напряжений [23]. Частичные дисклинации фиксируются по ямкам травления, расположенным в центре пентагональных фрагментов УИ (рис. 3г, 3д) и в вершинах совершенных УИ (рис. 3е), там же сходятся и обрываются двойниковые границы.

Правильные пентагональные фрагменты в УИ всегда со всех сторон окружены кристаллическими шестиугольными участками (рис. 2а, 2б) и отделены от них неравновесными малоугловыми границами, которые при подготовке тонких фольг для электронно-микроскопических исследований на просвет рассыпаются (рис. 3д, 3е).

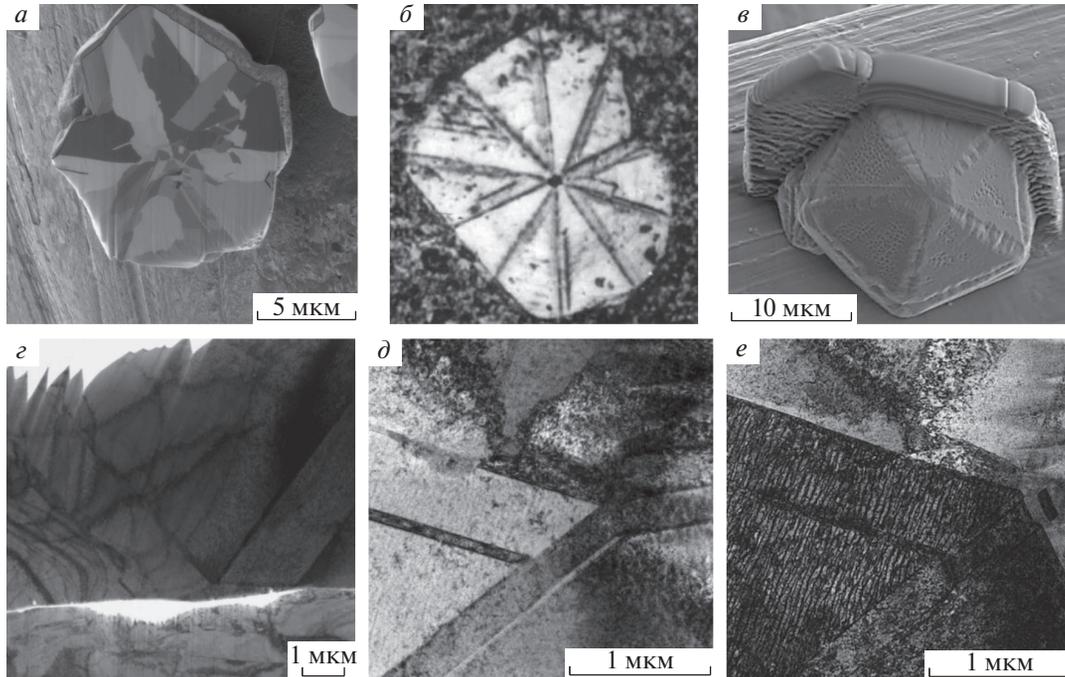


Рис. 3. Протравленный шлиф от произвольного сечения (а) и средней части усеченного икосаэдра (б), подготовка тонких фольг из микрочастиц (в), электронно-микроскопические картины от икосаэдрических частиц (с, д, е).

Дисклинационные модели строения икосаэдрических частиц

Объяснить особенности морфологии поверхности и внутреннего строения икосаэдрических частиц (рис. 2а, 2в), а также их эволюцию в процессе роста при электрокристаллизации можно, используя дисклинационные представления об их строении [5, 8, 24, 25].

Проведенные исследования показали, что икосаэдрические частицы фрагментированы и содержат по шесть дисклинаций (рис. 2а, 2в, 2г, 2е).

Свободная энергия фрагментированной частицы в виде УИ состоит из свободной поверхностной энергии E_S и свободной объемной энергии E_V , в последнюю входят энергия границ раздела всех объемных элементов $E_{гр}$, энергия самих дефектов $E_{деф}$ и часть энергии фазового превращения некристаллического состояния в кристаллическое $E_{фаз}$ (это энергия, запасенная в объеме всех некристаллических пентагональных участков, входящих в состав УИ)

$$E_{УИ} = E_S + E_{гр} + E_{деф} + E_{фаз}. \quad (1)$$

Учитывая, что поверхностная энергия УИ определяется 12-ю кристаллографическими плоскостями $\{110\}$ и 20-ю гранями из плоскостей $\{111\}$, получаем:

$$E_S = 12S_5\gamma_{110} + 20S_6\gamma_{111}, \quad (2)$$

где S_5 и S_6 – площади пятиугольников и шестиугольников на поверхности УИ; γ_{110} и γ_{111} – удельная поверхностная энергия кристаллографических граней меди.

Считаем, что объемные структурные элементы в виде пентагональных и шестигранных призм в УИ разделены 30 двойниковыми и 60 малоугловыми дислокационными границами. Тогда энергия границ раздела структурных элементов будет равна:

$$E_{гр} = 30S_3\gamma_{дв} + 60S_3\gamma_{муг}, \quad (3)$$

где S_3 – площадь треугольников, разделяющая структурные элементы в УИ; $\gamma_{дв}$, $\gamma_{муг}$ – удельная энергия двойниковых и малоугловых дислокационных границ.

Энергия незавершенного фазового превращения некристаллической структуры в кристаллическую может быть оценена как

$$E_{фаз} = \gamma_{фаз}V_{12}^5, \quad (4)$$

где V_{12}^5 – часть объема частицы, в котором еще сохраняется некристаллическое состояние (объем всех двенадцати пентагональных участков); $\gamma_{фаз}$ – удельная энергия фазового перехода из некристаллического состояния в кристаллическое, ее можно оценить как $\gamma_{фаз} = \frac{G}{70}$ [26], где G – модуль сдвига.

Энергия дисклинационных дефектов в икосаэдрических частицах:

$$E_{деф} = 6E_{\omega} = 6 \frac{G\omega^2 R^2}{16\pi(1-\nu)} 2R, \quad (5)$$

где E_{ω} – энергия частичной дисклинации; ω – мощность дисклинации ($7^\circ 20'$); R – радиус частицы; ν – коэффициент Пуассона.

Для оценки величины свободной энергии УИ по формуле (1) воспользуемся известными значениями характеристик меди, приведенными в работах [27, 28].

Аналогично проведем расчет свободной энергии СИ:

$$E_{\text{СИ}} = E_S + E_{\text{гр}} + E_{\text{деф}}. \quad (6)$$

Свободная энергия икосаэдрических частиц сильно зависит от их размеров, поэтому для оценки их стабильности более корректно использовать плотность свободной энергии.

Для расчетов используем оптимальные размеры для УИ и СИ, наблюдаемые в экспериментах, т.е. 5 и 20 нм.

Оценки по формулам (1) и (6) показывают, что плотности свободной энергии для совершенного и усеченного икосаэдров соответственно равны:

$$\rho_{\text{СИ}} \approx \frac{G}{1000} (\text{Дж} \cdot \text{м}^{-3}), \quad \rho_{\text{УИ}} \approx \frac{G}{700} (\text{Дж} \cdot \text{м}^{-3}).$$

Оценки говорят об энергетической выгоде трансформации УИ в СИ (рис. 2а, 2б), вероятно такие же превращения с микрочастицами будут происходить и в температурных полях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследована необычная структура пентагональных микрочастиц меди и ее эволюция в процессе роста. Фуллереноподобная микрочастица меди в виде усеченного икосаэдра состоит из миллиардов атомов меди, внутри сплошная, имеет гетерогенную структуру из кристаллических и некристаллических фрагментов, 6 осей симметрии пятого порядка, 32 грани из атомных плоскостей $\{110\}$ и $\{111\}$, содержит частичные дисклинации, большую, запасенную в объеме, упругую энергию, внешне частица похожа на фуллерен C_{60} , а по структуре на квазикристалл. Фуллереноподобная микрочастица меди микронного размера вырастает из некристаллических наночастиц и превращается из усеченного икосаэдра в совершенный. Показано, что это энергетически оправдано, однако незначительная разница в плотностях энергии частиц говорит о том, что появление усеченного и совершенного икосаэдра при электрокристаллизации равновероятно. Предложена дисклинационная модель строения икосаэдрических частиц, которая логично объясняет все их превращения в процессе роста.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации 16.2314.2017/4.6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Судзуки К., Фудзимори Х., Хасимото К. Амorfные металлы. М.: Металлургия, 1987. 328 с.
2. Gleiter H. // Phys. 1991. V. 47. № 8. P. 753.
3. Глезер А.М., Шурыгина Н.А. Амorfно-нанокристаллические сплавы. М.: Физматлит, 2013. 452 с.
4. Shechtman D., Blech I., Gratias D., Cahn J.W. // Phys. Rev. Lett. 1984. V. 53. № 20. P. 1951.
5. Викарчук А.А., Ясников И.С. Структурообразование в наночастицах и кристаллах с пентагональной симметрией, формируемой при электрокристаллизации металлов. Тольятти: ТГУ, 2006. 206 с.
6. Vikarchuk A.A., Volenko A.P. // Phys. Sol. St. 2005. V. 47. № 2. P. 352.
7. Ясников И.С. // Письма о матер. 2011. Т. 1. С. 51.
8. Викарчук А.А., Грызунова Н.Н., Боргардт Т.А. // Письма о матер. 2019. Т. 9. № 1. С. 124.
9. Викарчук А.А., Грызунова Н.Н., Грызунов А.М., Шафеев М.Р. // Вест. Тамбов. ун-та. Сер. естеств. и техн. науки. 2018. Т. 23. № 122. С. 54.
10. Викарчук А.А., Грызунова Н.Н., Глезер А.М., Степанов С.В. // Изв. вузов. Физ. 2018 Т. 61. № 6. С. 21; Vikarchuk A.A., Gryzunova N.N., Glezer A.M., Stepanov S.V. // Russ. Phys. J. 2018. V. 61. № 6. P. 1024.
11. Pinaa C.M., López-Acevedo V. // Acta Cryst. A. 2016. V. 72. P. 81.
12. Векилов Ю. Х., Черников М.А. // УФН. 2010. Т. 180. № 6. С. 561; Vekilov Yu.Kh., Chernikov M.A. // Phys. Usp. 2010. V. 53. № 6. P. 537.
13. Мильман Ю.В., Ефимов Н.А., И.В. Гончарова // Электрон. микроск. и прочность матер. Сер. Физ. материаловед., структура и свойства матер. 2012. № 18. С. 3.
14. Tene R. // Front. Phys. 2014. V. 9(3). P. 370.
15. Шпилевский Э. // Наука и инновации. 2006. № 5(39). С. 32.
16. Белянин В. // Наука и жизнь. 2005. № 10. С. 68.
17. Гамбург Ю.Д., Зангари Дж. Теория и практика электроосаждения металлов. М.: Бином. Лаб. знаний, 2015. 438 с.
18. Vikarchuk A.A., Gryzunova N.N., Dorogov M.V. et al. // Metal Sci. Heat Treatment. 2016. V. 58. № 1. P. 12.
19. Викарчук А.А. // Вест. Тамбов. ун-та. Сер. Естеств. и техн. науки. 2010. Т. 15. № 3-1. С. 794.
20. Tan Y-Z., Xie S-Y., Huang R-B., Zheng L-S. // Nat. Chem. 2009. V. 1. P. 450.
21. Баграмов Р.Х. Получение углеродных матер. с фуллереноподобной наноструктурой газостатическими и термобарическими методами. Дис. ... канд. тех. наук. Москва: НИТУ МИСиС, 2017. С. 122.
22. Штремель М.А. Прочность сплавов. Ч. 1. Дефекты решетки. Уч. для вузов. М.: Изд-во МИСиС, 1999. 384 с.
23. Козлов Э.В., Глезер А.М., Конева Н.А. и др. Основы пластических деформаций наноструктурированных материалов М.: Физматлит, 2016. 304 с.
24. Владимиров В.И., Романов А.Е. Дисклинации в кристаллах. Ленинград: Наука, 1986. 224 с.
25. Vikarchuk A.A., Gryzunova N.N., Gutkin M.Yu., Romanov A.E. // Rev. Adv. Mater. Sci. 2018. V. 55. P. 78.
26. Гудкин М.Ю., Овидько И.А. Дефекты и механизмы пластичности в наноструктурах и некристаллических матерериалах. СПб: Янус, 2001. 180 с.
27. Овидько И.А., Скиба Н.В. // Mater. Phys. Mech. 2014. Т. 21. № 3. С. 288.
28. Гуткин М.Ю., Овидько И.А., Скиба Н.В. // ФТТ. 2004. Т. 46. № 11. С. 1975; Gutkin M.Yu., Ovid'ko I.A., Skiba N.V. // Phys. Sol. St. 2004. V. 46. № 11. P. 2042.