

2. Горячева, И. Г. Механика фрикционного взаимодействия [Текст] / И. Г. Горячева. – М.: Наука, 2001. – 435 с.
3. Евдокимов, Ю. А. Тепловая задача металлополимерных трибосопряжений [Текст] / Ю. А. Евдокимов, В. И. Колесников, С. А. Подрезов. – Ростов на Дону: Из-во Ростовского ун-та, 1987. – 168 с.
4. Любимов, Д. Н. Физико-химические процессы при трении. Учеб. пособие [Текст] / Д. Н. Любимов, В. А. Рыжиков / Шахтинский институт ЮРГТУ. – Новочеркасск: ЮРГУ, 2003. – 142 с.
5. Колесников, В. И. Теплофизические процессы в металлополимерных трибосистемах [Текст] / В. И. Колесников. – М.: Наука, 2003. – 279 с.
6. Джанахмедов, А. Х. Нефтяная трибология [Текст] / А. Х. Джанахмедов. – Баку: Элм, 2003. – 326 с.
7. Балеску, Р. Равновесная и неравновесная статистическая механика [Текст] / Р. Балеску. – М.: Из-во. Мир, Т.1, 1978. – 405 с.
8. Лернер, М. И. Технология получения, характеристики и некоторые области применения электропорошков [Текст] / М. И. Лернер, Н. В. Сваровская, С. Г. Псахье, О. В. Бакина // Российские нанотехнологии. – 2009. – Т. 4, № 11–12. – С. 56–68.
9. Лернер, М. И. Формирование наночастиц при воздействии на металлический проводник импульса тока большой мощности [Текст] / М. И. Лернер, В. В. Шаманский // Журнал структурной химии. – 2004. – Т. 45. – С. 112–115.
10. Котов, Ю. А. Исследование частиц образующихся при электрическом взрыве проводников [Текст] / Ю. А. Котов, Н. А. Яворский // Журнал физика и химия обработки материалов – 1978. – № 4. – С.24–29.

У статті розглянута така досить важлива властивість ниткоподібних кристалів як пластична деформація. На підставі аналізу результатів раніше проведених експериментів показано вплив властивості на ступінь руйнування кристалів і сформульована невирішена частина наукової проблеми вивчення росту, структури і властивостей ниткоподібних кристалів, що виникла у зв'язку з необхідністю вирішення ряду практичних завдань

Ключові слова: ниткоподібні кристали, механічні властивості, структура, пластична деформація, дислокації, наукові дослідження

В статье рассмотрено такое достаточно важное свойство нитевидных кристаллов как пластическая деформация. На основании анализа результатов ранее проведенных экспериментов показано влияние свойства на степень разрушения кристаллов и сформулирована нерешенная часть научной проблемы изучения роста, структуры и свойств нитевидных кристаллов, возникшей в связи с необходимостью решения ряда практических задач

Ключевые слова: нитевидные кристаллы, механические свойства, структура, пластическая деформация, дислокации, научные исследования

УДК 548.31

СВОЙСТВА НИТЕВИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ. ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ

С. Р. Артемьев

Кандидат технических наук, доцент
Кафедра охраны труда и техногенно-
экологической безопасности
Национальный университет
гражданской защиты Украины
ул. Чернышевского, 94, г. Харьков,
Украина, 61000
E-mail: sergey.artemev.1967@mail.ru

1. Введение

Возможность образования кристаллов в форме тонких нитей, как в природе, так и искусственным путем, была известна достаточно давно. Однако как особая научная проблема, проблема изучения роста, структуры и свойств нитевидных кристаллов возникла в связи с необходимостью решения ряда практических задач.

Так, например, еще во время второй мировой войны перед инженерами возникла задача предотвращения коротких замыканий в радиодеталях, телефонных кабелях и т. д., вызываемых вырастающими на поверхности гальванических покрытий тончайшими металлическими иглоочками.

Уже много лет в различных странах проводятся работы по созданию композиционных материалов с особыми свойствами на основе нитевидных кристаллов,

что требует, прежде всего, разработки технологических методов получения высокопрочных нитевидных кристаллов в больших количествах.

Нитевидные кристаллы находят и ряд других научных и практических применений. Например, из полупроводниковых нитевидных кристаллов можно изготавливать высокочувствительные тензодатчики. Все это говорит в пользу того, что различные свойства нитевидных кристаллов должны быть детально изучены, в том числе и такое важное как пластическая деформация.

Нитевидные кристаллы могут разрушаться как хрупко, так и пластически. Нитевидные кристаллы $Al_2O_3, SiO_2, Te, Si, C, MoO_3$, а также ряд других разрушаются хрупко при комнатной температуре, Zn и Cd – при низких температурах (160 и 20° К соответственно) [1].

В других кристаллах разрушению предшествует значительная пластическая деформация. Например, нитевидные кристаллы Cu растягиваются на 70 % [2], NaCl – на 50–90 % [3], Cd и Zn на 500–600 % [4].

Нитевидные кристаллы некоторых веществ деформируются пластически, только начиная с определенной толщины, при этом у них наблюдается сильное упрочнение. Еще в 1952 г. в журнале Американского Физического общества появилась небольшая заметка ученых Херринга и Голта, в которой сообщалось, что кристаллы олова, вырастающие на электропокрытии в виде тончайших нитей (диаметром 1–2 мк), обладают прочностью, приближающейся к теоретической.

В свете давно назревшей задачи реализации теоретической прочности твердых тел это было открытием необычайной важности. Неудивительно, что сразу после появления этого сообщения началось широкое изучение свойств и природы прочности, условий образования и особенностей строения нитевидных кристаллов.

Активно изучались и вопросы деформации нитевидных кристаллов. К настоящему времени получены и исследованы нитевидные кристаллы 46 элементов и более 110 соединений.

2. Анализ литературных источников и постановка проблемы

Среди наиболее интересных научных публикаций, позволяющих оценить перспективность исследований нитевидных кристаллов и сформулировать нерешенные части общей проблемы их состава и свойств, пожалуй, могут быть выделены работы [1–18]. Именно в них показано, что развитие пластической деформации в нитевидных кристаллах имеет ряд проблемных специфических особенностей. Характерным является наличие ярко выраженного верхнего предела текучести (так называемого, «зуба текучести»).

Пластическое течение начинается при напряжениях σ на один – два порядка превышающих предел текучести обычных кристаллов, а затем, как правило, развивается при напряжениях, близких к напряжениям течения дефектных кристаллов.

Нитевидные кристаллы в целом являются уникальными и незаменимыми объектами в целом ряде физических исследований.

Наиболее определенные проблемы, связанные с нитевидными кристаллами, сводятся к следующим направлениям исследований:

- применение нитевидных кристаллов в научных исследованиях как уникальных объектов, обладающих высоким совершенством структуры и рядом особых свойств;
- поиски возможностей практического использования нитевидных кристаллов в технике;
- разработка рациональных и экономичных методов синтеза необходимого количества нитевидных кристаллов, используемых на практике;
- изыскание возможностей добычи и практического использования природных нитевидных кристаллов;
- применение нитевидных кристаллов и материалов, полученных на их основе, на практике.

Можно с уверенностью сказать, что исследование свойств нитевидных кристаллов включает в себя еще множество необычайно интересных и ценных возможностей и довольно широкую перспективу применения их в технике.

Использование нитевидных кристаллов в различных областях науки и техники вызвало необходимость проведения масштабных научных исследований, более или менее полно отражающих современное состояние указанной проблемы и, соответственно, их отображение в научных статьях.

3. Цели и задачи исследования

Целью данной статьи является продолжение литературного обзора по проблеме исследования и более углубленное изучение такого достаточно важного свойства нитевидных кристаллов, как пластическая деформация. Также целью статьи является оценка влияния данного свойства на степень разрушения данного вида кристаллов.

4. Оценка влияния пластической деформации на степень разрушения нитевидных кристаллов

Исследователи во все времена стремились познать истинную суть изучаемого явления или процесса. Вопреки известному высказыванию великого французского философа, математика и физика Блеза Паскаля о том, что «не только сама истина дает уверенность, но и само искание ее приводит к умиротворению и покою», часто наблюдается прямо противоположное явление: поиск истины затмевает саму истину. Так или почти так произошло с изучением такого свойства нитевидных кристаллов, как пластическая деформация.

Достаточно большое количество экспериментальных исследований ученых разных стран показали, что падение напряжения связано с резким нарастанием плотности дислокаций после начала пластической деформации [5].

Именно здесь было указано, что общий вид деформационной кривой качественно напоминает кривую деформации бездислокационных или малодислокационных полупроводниковых кристаллов, для которых возникновение «зуба текучести» определяется развитием интенсивного размножения дислокаций после достижения высокого уровня напряжений у его вершины.

Некоторые исследователи считают, что существование «зуба текучести» зависит от ориентировки нитевидных кристаллов.

Так, исследователь данного вопроса немецкий ученый Мейер в [6], описывая опыты по растяжению нитевидных кристаллов Cu на машине пружинного типа, показал, что «зуб текучести» появляется только на диаграммах растяжения образцов с осью роста $\langle 111 \rangle$, а предел текучести достигает величины 50 кГ/мм^2 . Предел текучести на диаграммах растяжения образцов двух других ориентировок $\langle 110 \rangle$ и $\langle 100 \rangle$ обычно не превышает 5 кГ/мм^2 .

Уже позже, спустя 5 лет, в 1966 году на машинах более жесткого типа («Instron») С. З. Бокштейн с кол-

легами такой зависимости не наблюдали [7]. Нитевидные кристаллы меди всех ориентировок давали на диаграммах растяжения значительный «зуб текучести».

Величина «зуба текучести» снижается с возрастанием толщины образцов, как это было показано Мейером на нитевидных кристаллах Cu. В 1967 году М. В. Захарова и др. подтвердили данную гипотезу.

Это связано, главным образом с тем, что размеры кристалла ограничивают размеры источников дислокаций, хотя не исключено и влияние поверхности. Из выражения для критического напряжения срабатывания дислокационного источника $\tau = G \cdot b / l$ (G – модуль сдвига, b – вектор Бюргера, l – длина источника) следует, что чем меньше длина источника, тем больше требуется напряжения для его работы.

Соответственно, с уменьшением толщины образца может быть обеспечено все меньшее расстояние между точками закрепления источника. При этом напряжение течения обратно пропорционально толщине образца.

Результаты обзора источников свидетельствуют о том, что нитевидные кристаллы часто обладают значительно большей пластичностью по сравнению с обычными монокристаллами.

Нитевидные кристаллы, например, алюмокалиевых квасцов, полученных кристаллизацией через силикагель, деформировались на 30 %, в то время как обычные кристаллы квасцов очень хрупки и разрушаются при незначительных нагрузках, что подробно было описано в [8].

Японские ученые Камиеси и Ямаками [9] обнаружили, что, например, в нитевидных кристаллах NaCl предельная пластическая деформация зависит от их поперечного размера. С уменьшением площади поперечного сечения образцов до 10^{-3} мм² предельная деформация возрастает до 90 %, однако при дальнейшем уменьшении сечения быстро уменьшается до нуля. Образцы толщиной менее 15 мм при этом разрушались достаточно хрупко.

Значительную пластичность толстых нитевидных кристаллов именно NaCl отмечал также ученый Гордон в своей работе [10], причем эта пластичность сохранялась после шестимесячного хранения образцов на воздухе.

Нитевидные кристаллы Zn в опытах Кабрера и Прайса толщиной менее 2 мк разрушались хрупко, а при толщине более 2 мк пластически деформировались с ярко выраженным «зубом текучести», что описано в [11].

Величина предельной пластической деформации в нитевидных кристаллах Zn и Cd, как было установлено М. В. Захаровой и др. практически 50 лет назад возрастает с ростом толщины образца только в тех случаях, когда пластическая деформация развивается однородно вдоль всего образца.

При образовании шейки в толстых образцах предельная пластическая деформация практически от толщины образца не зависит.

Как показал литературный обзор, пластическая деформация в нитевидных кристаллах обычно происходит путем распространения линий скольжения, которые можно легко наблюдать в оптическом микроскопе.

Такое подробное исследование структуры полос скольжения на разных стадиях деформации было сде-

лано японским ученым Йошидой и др. [12] на нитевидных кристаллах KCl с помощью как оптического, так и электрического микроскопов. На начальной стадии деформирования линии скольжения прямее и число их растет пропорционально степени деформации.

Внутри полос скольжения линии скольжения неоднородны по высоте ступеней сдвига и распределены неравномерно, но все они одного знака. Новые линии скольжения зарождаются перед распространяющейся полосой скольжения на расстоянии от нее практически в 10 мк. На более поздних стадиях деформирования, когда происходит упрочнение, прямые линии скольжения разбиваются на короткие линии и локально искривляются.

Полосы деформации при этом возникают в одном или нескольких местах (в более толстых образцах) кристалла, а затем распространяются вдоль всего образца от места, где начался сдвиг [12].

Распространение полос скольжения происходит неравномерно и сопровождается появлением скачков на кривых деформации. Данные более ранних работ о плавном протекании скольжения, например, в нитевидных кристаллах Zn, получены на недостаточно совершенных испытательных установках (1959 г, Кабрера).

Применение машин жесткого типа с автоматической регистрацией кривой деформации дало возможность обнаружить неоднородности течения, находящиеся в соответствии с электронно-микроскопическими исследованиями структуры полос скольжения.

В этом была заслуга ученых Волтерса (1961 г.), С. З. Бокштейна (1960 г.), Г. В. Бережковой (1967 г.), И. Л. Светлова (1966 г.), Йошиды (1965–1966 г. г.).

М. В. Захарова, например, связывает неоднородность сдвигов с поперечным скольжением дислокаций. Изучение геометрии скольжения и структуры полос скольжения деформированных микрокристаллов М. В. Захаровой показало, что при малой плотности дислокаций скольжение идет по единичным или очень близким параллельным плоскостям, дающим прямолинейные следы скольжения.

При большей плотности дислокаций развивается поперечное скольжение, обусловленное взаимодействием дислокаций между собой. В кристалле возникают барьеры и возле них скопления дислокаций, прорыв которых через препятствия определяет возникновение скачков на кривой течения.

Интенсивное поперечное скольжение, сопровождающееся размножением дислокаций, наблюдалось И. Кушнир и ее коллегами в [13] при исследовании методом избирательного травления движения дислокаций в микрокристаллах железа толщиной 20–50 мк и длиной от 50 мк до 1 мм.

Характерной особенностью нитевидных кристаллов является распространение сдвига по одной системе скольжения при существовании в кристалле эквивалентных систем. Это наблюдалось например, Чарсли на Cu, и описано в [14].

Выбор системы скольжения определяется кристаллографической ориентировкой кристалла и величиной стартовых напряжений дислокации. Следует отметить, что в нитевидных кристаллах скольжение может происходить в иных системах, чем в макрокристаллах [15].

Эта начальная стадия пластической деформации в нитевидных кристаллах названа стадией «легкого скольжения» [15]. На этой стадии происходит возникновение сдвига и распространение его на весь образец в виде пластической волны, а затем наступает упрочнение.

В нитевидных кристаллах КС1 упрочнение происходит с постоянной скоростью. В нитевидных кристаллах Сu и Со стадия упрочнения начинается после вступления в действие вторичных систем скольжения. В нитевидных кристаллах Сu с осью роста $\langle 111 \rangle$ распространение зоны сдвига иногда затормаживается в каких-то местах, кажущихся бездефектными в оптическом микроскопе, и начинается упрочнение.

В кристаллах же Сu с осью роста $\langle 100 \rangle$ происходит равномерное распространение полос скольжения по всему образцу (Йошида, 1966 г.).

Разрушение часто происходит на участках, на которые скольжение еще не распространилось вообще [16]. В более толстых образцах пластическая деформация развивается одновременно в нескольких системах скольжения. Например, в нитевидных кристаллах КС1 – по двум взаимно ортогональным системам, одна из которых позже становится неактивной.

При одновременной работе нескольких систем скольжения наблюдается упрочнение и кристалл на соответствующих участках деформируется в меньшей степени (1967 г., Захарова М. В.).

С упрочнением, вызываемым взаимодействием дислокаций, перемещающихся в разных системах скольжения, связан и факт, установленный Йошидой в 1965 году на кристаллах КС1, что чем толще образцы, тем при меньшей деформации наступает стадия нелинейного упрочнения и тем сильнее возрастает скорость упрочнения на стадии равномерного линейного упрочнения.

Подробно влияние различных физических и геометрических факторов на процессы деформирования нитевидных кристаллов исследовали советские ученые С. Бокштейн, С. Кишкин и И. Светлов в 1967 году.

Они показали, что так же, как и в массивных кристаллах, с уменьшением числа эквивалентных систем скольжения увеличивается протяженность области легкого скольжения нитевидных кристаллов и снижаются значения напряжения течения и коэффициента упрочнения.

Возрастание толщины образцов ведет к сокращению области легкого скольжения вплоть до полного ее исчезновения в образцах диаметром > 20 мк и снижению величины «зуба текучести». В толстых образцах нельзя обнаружить четкой границы между деформированными и недеформированными участками, поскольку отсутствует резкая локализация области сдвига.

Литературный обзор показал, что в опытах Г. Вейка [17] нанесение тонкой плёнки Ni на поверхность нитевидных кристаллов Fe приводило к отсутствию линий скольжения и сказывалось на повышении прочности.

Начало пластической деформации в нитевидных кристаллах также связано с появлением скользящих дислокаций. Прайсу [18] при деформировании в камере электронного микроскопа бездислокационных нитевидных базисных пластинок Zn, прозрачных для электронного пучка, удалось непосредственно наблюдать зарождение и развитие пластической деформации.

Упругая деформация достигала 0,2 % в пластинках шириной более 20 мк и 1 % в более узких образцах [18].

Для пластического течения необходимо размножение дислокаций. Однако из-за ограниченных размеров нитевидных кристаллов обычные для макроскопических кристаллов механизмы размножения не проявляются.

В нитевидных кристаллах иногда причиной начала пластического течения могут стать осевые ростовые дислокации. Это происходит в том случае, когда искривленный участок осевой дислокации попадает значительной частью в плоскость скольжения.

Несколько схем, поясняющих такую возможность для случая нитевидных кристаллов с гексагональной плотной упаковкой, приводятся А. Предводителевым и М. Захаровой в указанном выше источнике. Искривления осевой дислокации могут привести к образованию источников Франка-Рида и дальнейшему развитию пластического течения в данной зоне скольжения.

Авторы указанного источника считают, что начало пластической деформации связано с осевыми дислокациями, так как верхний предел текучести в этих кристаллах пропорционален $1/d^2$, где d – диаметр кристалла (т. е. пропорционален вероятности наличия осевых дислокаций).

Следует отметить, что в Советском Союзе учеными успешно проводились исследования не только на пластическую деформацию, но и на ползучесть, усталость, внутреннее трение кристаллов, двойникование, что будет предметом отдельного рассмотрения и анализа.

Уже более 45 лет ведутся интенсивные исследования особых свойств нитевидных кристаллов, к которым относят и пластическую деформацию. Из предмета чисто научного исследования они превращаются в объект, находящий уже сейчас свое применение в различных отраслях промышленности. Однако они продолжают сохранять большое научное значение как в области развития теорий роста, так и при изучении физических свойств твердых тел.

Исследования нитевидных кристаллов уточняют наше представление о совершенной кристаллической решетке и ее свойствах, а также о реальной структуре поверхности кристаллов и ее влиянии на свойства кристаллических тел. Большая будущность нитевидных кристаллов достаточно актуальна и очевидна.

В настоящее время нитевидные кристаллы известны исследователям не только как объект с необычной морфологией, но главным образом как объект с уникальными свойствами, которые начинают получать новые интересные применения. Для изучения этих свойств, связи их с условиями образования и особенностями строения разработано много методов получения нитевидных кристаллов, в том числе в лабораторных условиях.

5. Выводы

Таким образом, в материале данной статьи на основании проведенного литературного обзора были рассмотрены результаты ранее проведенных научных исследований по вопросам влияния пластической деформации различных групп нитевидных кристаллов на их структуру. Были проанализированы результаты данных исследований с точки зрения будущей использования кристаллов, более углубленно рассмотрены принципы влияния деформационных испытаний на структуру кристаллической решетки кристаллов.

Литература

1. Бережкова, Г. В. Нитевидные кристаллы [Текст] / Г. В. Бережкова. – М.: Госиздат, 1969. – 158 с.
2. Brenner, S. S. Cross Sectioning of Whiskers [Text] / S. S. Brenner, C. R. Morelock // Review of Scientific Instruments. – 1957. – Vol. 28, Issue 8 – 652 p.
3. Kamiyoshi, K. I. Sci. Repts. Inst. Ser. A [Text] / K. I. Kamiyoshi, I. Yamakami // Sci. Repts. Inst. Ser. A. – 1960. – № 28. – 258 p.
4. Захарова, М. В. ФТТ [Текст] / М. В. Захарова, А. А. Предводителев, В. Н. Ржавский, Г. В. Бережкова // ФТТ. – 1967. – № 9. – С. 997 – 1000.
5. Классен-Неклюдова, М. В. Кристаллография [Текст] / М. В. Классен-Неклюдова, В. Н. Рожанский. – 1962. – № 7. – 499 с.
6. Meyer, Y. Festkörperphysik [Text] / Y. Meyer. – Berlin 1961. – № 1. – 519 p.
7. Бокштейн, С. З. физика твердого тела [Текст] / С. З. Бокштейн, С. Т. Кишкин, И. Л. Светлов // ФТТ. – 1966. – № 8. – 688 с.
8. Wei, C. T. J. Appl. Phys [Text] / C. T. Wei. – 1959. – № 30. – 1457 p.
9. Kamiyoshi, K. I. J. Phys. Sos. Japan [Text] / K. I. Kamiyoshi, I. Yamakami, 1960. – № 15. – 1347 p.
10. Gordon, J. E. Growth and Perfection of Crystals [Text] / J. E. Gordon. – 1959. – 219 p.
11. Cabrera, N. Growth and Perfection of Crystals. N. Y., John Wiley [Text] / N. Cabrera, P. V. Price. – 1959. – № 3. – 204 p.
12. Yoshida, K. J. Appl. Phys. [Text] / K. Yoshida. – 1966. – № 5. – 405 p.
13. Кушнир, И. П. Кристаллография [Текст] / И. П. Кушнир, Л. К. Михайлова, Ю. А. Осипьян. – 1965. – № 10. – 87 с.
14. Charsley, P. Acta metallurgica [Text] / P. Charsley. – 1960. – № 8. – 353 p.
15. Bayer, P. D. J. Mater. Sci [Text] / P. D. Bayer, R. E. Cooper. – 1967. – № 2. – 301 p.
16. Кушнир, И. П. Дислокации в металлах и вопросы прочности [Текст] / И. П. Кушнир, Ю. А. Осипьян // Изд. АН СССР, 1961. – 11 с.
17. Вейк, Г. Проблемы совр. мет. [Текст] / Г. Вейк. – 1959. – № 5. – 128 с.
18. Price, P. V. Philos. Mag. [Text] / P. V. Price. – 1960. – № 5. – 1973 p.

УДК 669.268

ВОЗНИКНОВЕНИЕ СФЕРОЛИТОВ И ПЕНТАГОНАЛЬНЫХ КВАЗИКРИСТАЛЛОВ В ЭЛЕКТРООСАЖ- ДАЕМЫХ МЕТАЛЛАХ

О. Б. Гирин

Доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой*

E-mail: girin@ua.fm

В. И. Овчаренко

Кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры*

E-mail: kafmat@i.ua

*Кафедра материаловедения

Украинский государственный химико-
технологический университет
пр. Гагарина, 8, г. Днепрпетровск,
Украина 49005

Виявлено утворення сферолітів та пентагональних квазікристалів у шарах електроосаджуваних металів, прилеглих до катоду. Зроблено висновок, що наявність сферолітів та пентагональних квазікристалів в електроосаджених металах є наслідком надшвидкого твердіння переохолодженої рідкої металевої фази, яка утворюється при електрохімічному осадженні металів. Одержаний результат доводить достовірність явища фазоутворення електроосаджуваних металів через стадію рідкого стану

Ключові слова: сфероліт, пентагональний квазікристал, рідкий стан, електроосаджений метал, переохолодження, надшвидке твердіння

Виявлено образование сферолитов и пентагональных квазикристаллов в слоях электроосаждаемых металлов, прилегающих к катоду. Сделан вывод, что наличие сферолитов и пентагональных квазикристаллов в электроосажденных металлах является следствием сверхбыстрого затвердевания переохлажденной жидкой металлической фазы, образующейся в процессе электрохимического осаждения металлов. Полученный результат доказывает достоверность явления фазообразования электроосаждаемых металлов через стадию жидкого состояния

Ключевые слова: сферолит, пентагональный квазикристалл, жидкое состояние, электроосажденный металл, переохладение, сверхбыстрое затвердевание

1. Введение

На основе обобщения результатов экспериментальных и теоретических исследований установлено явление

фазообразования электроосаждаемых металлов через стадию жидкого состояния [1–8]. Сущность этого явления состоит в том, что при электрохимическом осаждении металла в водной среде на твердый катод