



Артемьев С. Р.

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НИТЕВИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ. ПОЛЗУЧЕСТЬ И ВНУТРЕННЕЕ ТРЕНИЕ

*Рассмотрены результаты ранее проведенных исследований нитевидных кристаллов по вопросам изменения характеристик ползучести и внутреннего трения, проанализированы результаты данных исследований с точки зрения влияния на них приложенной загрузки, приводящей к изменению структуры кристаллов. Представленные результаты обзора литературных источников в целом свидетельствуют о существенном негативном влиянии указанных свойств на прочность кристаллов.*

**Ключевые слова:** нитевидные кристаллы, нагрузка, ползучесть, внутреннее трение.

### 1. Введение

Нитевидными кристаллами называют монокристаллы нитевидной формы, что обуславливает существенные особенности их свойств. Это могут быть иголки, как прямые, так и закрученные в спираль, плоские ленты, образования неправильной формы или с ответвлениями. Одни из них имеют осевые каналы (полые или с включениями), другие могут расти в двойникованном положении.

Направления их роста обычно совпадают с кристаллографическими направлениями малых индексов. Свойства нитевидных кристаллов резко зависят от их толщины и совершенства структуры. На первом месте среди них, конечно, стоит прочность, приближающаяся для малых поперечных размеров к теоретически возможным пределам, но немаловажное значение принадлежит таким механическим свойствам, как внутреннее трение и ползучесть, о результатах исследований каких и пойдет речь в данной статье.

### 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

В последние 30 лет многие уже привыкли к мысли о том, что металлоорганические соединения начинают занимать заметное положение среди других исходных веществ, используемых при получении металлических порошков, пленок, покрытий и даже готовых массивных изделий из газовой фазы.

Вместо громадных гальванических производств и дорогостоящих недолговечных установок на машиностроительных и электронных предприятиях появляются высокопроизводительные безотходные производства «малой» химии, обеспечивающие не только получение высококачественных изделий, но и выполнение экологических требований по защите человека и окружающей его среды.

Несмотря на то, что, круг возможностей металлоорганических соединений в направлении создания материалов на их основе достаточно четко определен, особенность данного направления исследований состоит в том, что оно неисчерпаемо и часто вторгается в, казалось бы, несвойственные ему области.

Именно поэтому, в частности, с помощью металлоорганических соединений уже сейчас выращиваются из газовой фазы готовые к использованию эмиттеры (источники электронов), нитевидные кристаллы для чувствительных датчиков, реагирующих на малые изменения температуры или давления и многое другое. Анализ литературных данных этой статьи свидетельствует о том, что в этих, да и многих других процессах на свойства нитевидных кристаллов влияли и продолжают влиять ряд механических свойств. К ним относят внутреннее трение и ползучесть.

В частности помимо фундаментальных исследований более позднего времени в современной науке описываются и более современные подходы к исследованию различных свойств нитевидных кристаллов. Так, в [1] авторами рассмотрены перспективные направления использования «вискеров» именно с учетом влияния их характеристик на развитие конкретного направления науки, в [2] рассмотрены вопросы технологий обработки нитевидных кристаллов, возможности создания биосовместимых материалов, а также исследованы свойства нитевидных кристаллов как наноматериалов.

В работе [3] ученым Номери М. достаточно углубленно рассматриваются физические свойства монокристаллов и особенное внимание уделено оптическим свойствам нитевидных кристаллов.

### 3. Цель и задачи исследования

Проведенный в данной статье литературный обзор [1–17] в указанном ракурсе показал на то, что в достаточно большом количестве научных изданий, в основном зарубежных, отображены вопросы проведения исследований нитевидных кристаллов на ползучесть и внутреннее трение, о чем следует остановиться подробнее.

Целью данной статьи является обзор литературных источников по материалам результатов ранее проведенных исследований нитевидных кристаллов, связанных с вопросами изменения характеристик ползучести и внутреннего трения, анализ результатов данных исследований с точки зрения влияния на них приложенной нагрузки, проведение оценки негативного влияния данных свойств на изменение структуры самих кристаллов.

#### 4. Результаты исследования ползучести и внутреннего трения в нитевидных кристаллах

Исследования ползучести в нитевидных кристаллах проводились в ряде работ на Si [4], Fe [4, 5], Cu [5], Zn [6], Cd [7]. Их результаты свидетельствовали о том, что в толстых образцах данных кристаллов закономерности ползучести были абсолютно те же, что в макрокристаллах и лишь с толщины  $< 10$  мк начинал проявляться ряд особенностей, связанный с малой дефектностью нитевидных кристаллов.

Течение наступало после определенного инкубационного периода с возрастающей скоростью. После достижения максимального значения скорость ползучести падала практически до нуля. Установившаяся ползучесть при этом отсутствовала [8].

Как показали исследования, начальная скорость ползучести растет с увеличением приложенной нагрузки. В некоторых образцах ползучесть практически не наблюдается вообще. Большинство нитевидных кристаллов упруго деформируется до предела текучести без каких-либо признаков пластической деформации, в других же кристаллах ползучесть обнаруживается в «упругой» области [9, 10].

Такие особенности ползучести в нитевидных кристаллах связаны с выходом имеющихся в них дислокаций без заметного размножения. Исследователь данной проблемы Прайс в 1959 году изучал связь ползучести с дислокационной структурой базисных пластинок Zn толщиной 0,5 мк с помощью электронного микроскопа и установил, что ползучесть наблюдалась только в образцах, содержащих дислокации либо ростовые, либо возникшие под действием напряжения у точек закрепления.

Ряд косвенных экспериментальных доказательств именно такой точки зрения были представлены советскими учеными А. Серебряковым, В. Костюком и К. Зилингом в 1965 году. Заметное последствие ними было установлено только на первом участке кривой ползучести, когда еще не все дислокации вышли из кристалла.

Если в кристалл введены дислокации (ударом, например, песчинки) после прекращения ползучести и снятия напряжений, то при повторном нагружении ползучесть возникает вновь, но при напряжениях значительно меньших, и быстро прекращается со временем.

Проведенный эксперимент дал одинаковый результат при многократном повторении на одном и том же образце. При введении большого числа дислокаций ползучесть имеет закономерности, свойственные обычным материалам. После прекращения ползучести прочность нитевидных кристаллов значительно возрастает.

На нитевидных кристаллах NaCl, например, проводилось ряд исследований дислокационной структуры параллельно с испытаниями на ползучесть. При этом образцы подвергались избирательному травлению до и после механического испытания. Оказалось, что все имеющиеся на поверхности ямки травления после окончания ползучести и повторного травления становились плоскодонными, что свидетельствовало о перемещении дислокаций с ранее занимаемых мест, а новые выходы дислокаций при этом не обнаруживались.

Такой метод исследования, конечно, не является доказательством полного отсутствия дислокаций

в кристалле, но позволяет утверждать, что в процессе ползучести число их в нитевидных кристаллах сильно снижается (Бережкова Г., 1966 г.).

Поведение нитевидных кристаллов при приложении знакопеременной нагрузки подтверждает их высокое совершенство. Так, ряд усталостных испытаний на нитевидных кристаллах Cu проводил ученый Эйсер [11] при изгибных колебаниях с различной амплитудой.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что к усталостному разрушению приводит именно пластическая деформация.

В его опытах никогда не имело места хрупкое разрушение даже при деформациях в 4 % (что соответствует напряжению  $470 \text{ кг/мм}^2$ ) в образцах с осью  $< 110 >$ . Пластическая деформация происходила путем образования локальных изгибов, внезапно возникающих в наиболее напряженных участках около закрепленного конца. Разрушение наступало в месте образования изгиба через несколько тысяч циклов после его возникновения.

В проводимых параллельно статических испытаниях образования локальных изгибов не наблюдалось ни разу. Так, изучение поведения нитевидных кристаллов Cu и Fe при усталостных испытаниях проводили ученые И. Одинг и И. Копьев в 1961 году [12, 13]. Испытываемый кристалл приклеивался к тонкому стандартному образцу из оргстекла или другого материала. Образец-носитель работал на знакопеременный изгиб, нитевидный кристалл — на «растяжение — сжатие». Нитевидные кристаллы Cu и Fe обнаружили при этом высокую усталостную прочность. Так, нитевидные кристаллы Cu выдерживали более 107 циклов при напряжении до  $120 \text{ кг/мм}^2$  и большинство из них не удалось разрушить.

Исследование релаксационных свойств нитевидных кристаллов согласуется с имеющимися в литературе представлениями о природе дефектов, снижающих их прочность, что указано в [14–16].

Литературный обзор показал, что впервые внутреннее трение в нитевидных кристаллах было измерено учеными Контом и др. на образцах Fe толщиной 30–70 мк методом крутильных колебаний.

Более точные измерения при помощи крутильного микромаятника были сделаны исследователем Шуреровой [17] на нитевидных кристаллах Cu и Fe. Было установлено, что внутреннее трение в нитевидных кристаллах во много раз меньше, чем в обычных. Однако следует заметить, что при этом не наблюдалось закономерной корреляции между величиной логарифмического декремента затухания и размером образцов.

Подробное изучение внутреннего трения в нитевидных кристаллах Cu и смеси «Cu-Fe» было проведено В. Постниковым и др. в 1966 году на низкочастотном крутильном микромаятнике в интервале температур от 20 до  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  в условиях вакуума ( $2 \cdot 10^{-5}$ – $5 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст.). Позже этими учеными была сконструирована установка для измерения внутреннего трения и модуля упругости нитевидных кристаллов методом изгибных колебаний, что позволило определить расширение частотного диапазона исследований и полностью устранить осевые напряжения образцов. После измерения внутреннего трения те же самые образцы испытывались и на растяжение. Данный факт в своей монографии подтверждается и Г. Бережковой.

Испытаниям подвергались образцы как с совершенной, так и с дефектной поверхностью. Во время

проведения исследований учеными была обнаружена существенная зависимость внутреннего трения от толщины образца. Нитевидные кристаллы диаметром более 20 мк имели при этом то же внутреннее трение, что и обычные монокристаллы.

Минимальное внутреннее трение имели образцы тоньше 10 мк, обладающие максимальной прочностью и ярко выраженным «зубом текучести». Как показал литературный обзор, учеными было отмечено, что нитевидные кристаллы с дефектной поверхностью всегда имеют низкую прочность, но не всегда обладают высоким внутренним трением.

Наклеп при пластической деформации вызывал всегда у нитевидных кристаллов значительное возрастание внутреннего трения. Так, в образце толщиной 4,8 мк, деформированном до стадии скольжения, внутреннее трение возросло в 20 раз за счет размножения дислокаций в процессе пластической деформации. Последующий отжиг при 700 °С в течение 1 часа почти полностью восстанавливал внутреннее трение, вероятно в результате выхода дислокаций на поверхность под действием напряжений, создаваемых самими дислокациями.

## 5. Выводы

Таким образом, в материале данной статьи были рассмотрены результаты различных ранее проведенных исследований нитевидных кристаллов по вопросам изменения характеристик ползучести и внутреннего трения, проанализированы результаты данных исследований с точки зрения влияния на них приложенной загрузки, приводящей к изменению структуры кристаллов.

## Литература

1. Шишелова, Т. И. Нитевидные кристаллы [Текст] / Т. И. Шишелова, Н. Е. Степанова, Д. А. Плынская, М. А. Беляева // Успехи современного естествознания. — 2009. — № 8. — С. 12–13.
2. Померанцева, Е. А. Нитевидные кристаллы [Текст]: материалы Всероссийской конференции «Исследования и разработки по приоритетному направлению развития науки, технологий и техники «Индустрия наносистем и материалы», 18–19 января 2007 года, г. Москва / Е. А. Померанцева, М. Г. Козлова, Л. С. Леонова, Ю. А. Добровольский, Т. Л. Кулова, А. М. Скундин, Е. А. Гудилин, Ю. Д. Третьяков // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». — 2007. — № 1(45). — С. 126–127. — Режим доступа: \www/URL: [http://isjaee.hydrogen.ru/pdf/01\\_07\\_Pomerantseva-2.pdf](http://isjaee.hydrogen.ru/pdf/01_07_Pomerantseva-2.pdf).
3. Номери, М. А. Х. Получение и исследование оптических свойств полупроводниковых оксидов ZnO<sub>2</sub> и Zn<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [Текст]: дисс. канд. физ.-мат. наук / Хадия Абасс Мохамед Номери. — Воронеж, 2011. — 128 с.
4. Eisner, R. L. Growth and Perfection of Crystals [Text] / R. L. Eisner. — N. Y.: John Wiley, 1959. — № 21. — 191 p.
5. Brenner, S. S. Growth and Perfection of Crystals [Text] / S. S. Brenner. — N. Y.: John Wiley, 1959. — № 12. — 157 p.
6. Cabrera, N. Growth and Perfection of Crystals [Text] / N. Cabrera, P. B. Price. — N. Y.: John Wiley, 1959. — № 3. — 204 p.
7. Серебряков, А. В. Физика твердого тела [Текст] / А. В. Серебряков, В. Г. Костюк, К. К. Зилинг // ФТТ. — 1965. — Т. 7. — 858 с.
8. Бережкова, Г. В. Нитевидные кристаллы [Текст] / Г. В. Бережкова. — М.: Госиздат, 1969. — 158 с.
9. Price, P. B. On microcreep in zinc whiskers [Text] / P. B. Price // Philosophical Magazine. — 1960. — Vol. 5, № 52. — P. 417–419. doi:10.1080/14786436008235860.
10. Pearson, G. Deformation and fracture of small silicon crystals [Text] / G. Pearson, W. Read Jr., W. Feldmann // Acta Metallurgica. — 1957. — Vol. 5, № 4. — P. 181–191. doi:10.1016/0001-6160(57)90164-5.
11. Eisner, E. Fatigue Straining of Copper Whisker [Text] / E. Eisner // Nature. — 1960. — Vol. 188, № 4757. — P. 1183–1184. doi:10.1038/1881183b0.
12. Одинг, И. А. Металловедение и термическая обработка металлов [Текст] / И. А. Одинг, И. М. Копьев. — 1961. — № 9. — С. 44.
13. Одинг, И. А. Дислокации в металлах и вопросы прочности [Текст] / И. А. Одинг, И. М. Копьев. — Изд. АН СССР, 1961. — 20 с.
14. Постников, В. С. Релаксационные свойства медножелезных нитевидных кристаллов [Текст] / В. С. Постников, С. А. Аммер, А. Т. Косилов, А. М. Беликов // ФММ. — 1966. — Т. 21, № 5. — С. 770–773.
15. Zevu, P. W. Appl. Phys. [Text] / P. W. Zevu, O. F. Cammerer. — 1955. — № 26. — P. 182.
16. Постников, В. С. Физика твердого тела [Текст] / В. С. Постников, С. А. Аммер, А. Т. Косилов. — 1967. — Т. 9, № 1. — С. 227–231.
17. Schurerova, E. Ceskosl. Casop. Fys. [Text] / E. Schurerova. — 1964. — № 14. — P. 151.

## ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ НИТКОПОДІБНИХ КРИСТАЛІВ. ПОВЗУЧІСТЬ ТА ВНУТРІШНЄ ТЕРТЯ

Розглянуто результати раніше проведених досліджень ниткоподібних кристалів у напрямку змін їх характеристик стосовно повзучості та внутрішнього тертя, проаналізовано результати досліджень з точки зору застосування на них додаткового навантаження та підсумкового впливу даних змін на загальну структуру кристалів. Представлені результати літературного огляду свідчать про суттєвий негативний вплив зазначених властивостей на міцність кристалів.

**Ключові слова:** ниткоподібні кристали, навантаження, повзучість, внутрішнє тертя.

*Артемьев Сергей Робленович, кандидат технических наук, доцент, кафедра охраны труда и техногенно-экологической безопасности, Национальный университет гражданской защиты Украины, Харьков, Украина, e-mail: sergey.artemov.1967@mail.ru.*

*Артем'єв Сергій Робленович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра охорони праці та техногенно-екологічної безпеки, Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна.*

*Artemev Sergey, National University of Civil Defense of Ukraine, Kharkiv, Ukraine, e-mail: sergey.artemov.1967@mail.ru*