



Артемьев С. Р.

СВОЙСТВА НИТЕВИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ. МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ

Рассмотрены результаты различных ранее проведенных исследований прочностных характеристик различных групп нитевидных кристаллов, проанализированы результаты данных исследований с точки зрения практического использования кристаллов, рассмотрены факторы влияния механических испытаний на структуру кристаллической решетки и свойства нитевидных кристаллов.

Ключевые слова: прочностные характеристики, нитевидные кристаллы, механические испытания.

1. Введение

Нитевидные кристаллы обладают рядом особых свойств, отличающих их от макрокристаллов. Наиболее замечательной особенностью нитевидных кристаллов являются их упругие свойства [1]. Впервые количественные оценки упругих свойств нитевидных кристаллов были сделаны достаточно недавно, лишь в 1952 году. Именно тогда научными исследователями Херрингом и Голтом было показано, что нитевидные кристаллы, например, олова, диаметром 1,8 мк до деформации порядка 1–2 % вели себя достаточно упруго. И лишь при изгибе, приводящем к деформации в поверхностных слоях до 3 %, действительно начиналась пластическая деформация. Эти значения предельной упругой деформации были близки к теоретическим оценкам [2].

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Проведенный литературный обзор [1–43] в указанном ракурсе показал на то, что в определенном количестве научных изданий, в большинстве своем зарубежных, отображены вопросы проведения механических исследований нитевидных кристаллов. Так, теоретическая прочность кристаллов была рассчитана Френкелем [3] для простейшей модели еще в 1926 году. Теоретическая прочность ионных кристаллов также была рассчитана другими исследователями на основании рассмотрения электростатического взаимодействия между ионами [4] с учетом Ван-дер-Ваальсовых сил, о чем было указано в источнике [5].

В частности для металлов были сделаны попытки более строго учитывать структуру решетки и характер межатомных связей при оценке теоретического напряжения сдвига, необходимого для зарождения скольжения в отсутствие при этом дислокаций. Они не привели к существенному изменению оценок того же Френкеля.

Так, Маккензи в 1948 году в [6] получил значения прочности 6/30, Орован в 1940 году в [7] от 6/10 до 6/50, что соответствовало предельной упругой деформации 2–10 %. Однако на практике прочности, приближающиеся к теоретическим возможным, получали лишь в отдельных случаях (например, Иоффе). Реально современные ученые в нынешних условиях практически

приблизились к возможности иметь материалы с прочностью, близкой к теоретической. Такими материалами являются как кристаллы, практически не содержащие дефектов (бездислокационные кристаллы), так и дефектные кристаллы, в которых подвижность дислокаций подавлена. Нитевидные кристаллы, обладающие достаточно совершенной структурой и поверхностью, достигают при этом наиболее рекордных прочностей.

В материале данной статьи на основании проведенного литературного обзора рассмотрены результаты некоторых проведенных механических испытаний и их влияние на свойства нитевидных кристаллов.

3. Цель и задачи исследования

Для изучения механических свойств нитевидные кристаллы обычно испытывались на изгиб, растяжение, кручение, ползучесть и усталость. Высокие прочностные свойства нитевидных кристаллов обнаруживались при этом практически во всех видах нагружения, хотя иногда характер напряженного состояния существенно изменял предел текучести.

В материале данной статьи рассмотрены результаты различных ранее проведенных исследований прочностных характеристик различных групп нитевидных кристаллов, проанализированы результаты данных исследований с точки зрения будущей использования кристаллов, более углубленно рассмотрены принципы влияния механических испытаний на структуру кристаллической решетки и свойства нитевидных кристаллов.

4. Литературный обзор

Наиболее простой и удобный способ, конечно же, испытание на изгиб. Вероятность внести искажения в нитевидные кристаллы при этом наименьшая, поскольку не требуется специальное закрепление образца, и такие испытания можно проводить, даже не отрывая нитевидные кристаллы от подложки. Поэтому этот способ был успешно применен для испытания наиболее коротких и тонких образцов. Величина деформации при этом оценивалась из отношения радиуса образца к радиусу изгиба. Однако при изгибе при этом имело место неоднородное напряженное состояние.

Так, в частности Хирсом в [8] было показано, что нитевидные кристаллы Sn, самопроизвольно выросшие на электропокрытии, обладают большой прочностью на изгиб и малой на растяжение. Для испытания нитевидных кристаллов на растяжение [9, 10], кручение [11, 12] и ползучесть [13] был разработан ряд специальных установок. При создании испытательных машин для нитевидных кристаллов у ученых возникали большие трудности, связанные со спецификой объекта. Несмотря на высокую удельную прочность нитевидных кристаллов, нагрузки, при которых происходило разрушение или начиналась пластическая деформация, обычно составляли несколько граммов. Так, в случае рекордной прочности в 1340 кГ/мм^2 нитевидных кристаллов Fe диаметром $1,6 \text{ мк}$ нагрузка составляла всего $2,5 \text{ Г}$ [14].

В ранних опытах (1956 г.) часто применялись установки, предложенные тем же Бреннером [14], которые представляли собой рычажные системы (иногда просто лабораторные весы) с вертикальным или горизонтальным закреплением образца. Для плавного нагружения усилие к образцу прикладывалось через поплавков, находящийся в масле, который втягивался в магнитное поле соленоида или дифференциального трансформатора.

Позже (1959 г.) был сконструирован еще ряд установок для деформирования образца либо с постоянной скоростью нагружения, либо с постоянной скоростью деформации [15–17]. Наиболее интересные варианты машин были предложены опять-таки Марчем в [17], а также Надгорным и Степановым в [18]. В обоих случаях деформация исследователями определялась с помощью микроскопа. На машине Марча удлинение образца в интервале до 15 мм измерялось с очень высокой точностью. Диапазон нагрузок составлял при этом от 1 мг до 400 г . На этой же машине можно было испытывать и тонкие пленки.

На машине Надгорного и Степанова можно было проводить испытания как на растяжение при разных скоростях (от 12 до 600 мк/мин.), так и на изгиб в диапазоне нагрузок от 200 мг до 100 г . При этом чувствительность по силе в случае растяжения составляла $0,3 \text{ мг}$, в случае изгиба — $0,03 \text{ мг}$, по деформации — $0,5 \text{ мк}$.

При проведении испытаний самых тонких образцов, как показал литературный обзор, возникали большие ошибки из-за несоосности образца и растягивающего усилия. Эти трудности были учтены исследователями Лемке и Крафтом в работе [19] при создании специальной установки для испытания образцов толщиной $< 1 \text{ мк}$ с приспособлением для установки образца на основе двукружного гониометра. Деформация при этом измерялась по фотографиям образца с метками.

Однако следует заметить, что, несмотря на высокую чувствительность, в этих машинах [18, 19], отсутствовала запись кривой деформации $\sigma = f(\epsilon)$, которая была крайне необходима для точной регистрации изменения напряжений после начала пластической деформации и для наблюдения за ходом развития пластического течения, особенно при неоднородной пластической деформации.

К настоящему времени в литературе уже подробно описано несколько установок для растяжения нитевидных кристаллов с автоматической записью кривых деформации, в частности в [20, 21]. Именно на этих установках можно было проводить, и сейчас успешно проводятся исследования процессов развития пластической деформации в нитевидных кристаллах, проявляю-

щих ряд существенных и специфических особенностей, свойственных этому объекту. Так, с применением таких машин, позволяющих автоматически регистрировать кривую деформации, было обнаружено, что скольжение во всех нитевидных кристаллах происходило весьма неравномерно.

Нитевидные кристаллы требуют большой осторожности при работе с ними, чтобы в результате внесения дефектов при манипулировании не сделать их непригодными для последующих механических испытаний. Закрепление образцов в испытательной машине производилось учеными обычно с помощью микроманипуляторов. Правильность установки при этом проверялась микроскопом или бинокулярной лупой, которыми снабжались все испытательные машины. Соединение образца с держателями осуществлялось специальными склеивающими веществами (дифенилкарбазидом, пицеином, зубным цементом, твердеющими пластиками и др.).

При механических испытаниях нитевидных кристаллов очень важным моментом являлось определение площади поперечного сечения, поскольку неточности именно в ее оценке вносят наибольшие ошибки в измерение прочности. На сегодняшний день уже разработан ряд методик получения поперечных срезов кристаллов. Обычно образец заклеивался в специальный пластик, как показано в работах [21, 22], после чего известными металлографическими методами приготавливаются шлифы. Определение площади сечения производилось планиметрированием фотоснимка шлифа. Большую точность определения поперечных размеров нитевидных кристаллов дают примененные Фридманом в [23] методы интерферометрии и теневого электронномикроскопического изображения.

Как показал проведенный литературный обзор, прочность нитевидных кристаллов определялась при различных способах механических испытаний. Во многих случаях (в частности, при изгибе) измерялась не прочность, а предельная упругая деформация, по которой в соответствии с законом Гука и вычислялись напряжения.

При больших упругих деформациях, что описано у Г. Бережковой, наблюдалось отклонение от требований закона Гука, в нитевидных кристаллах Zn это отклонение начиналось с $0,5 \%$, в Fe — с 2% [24], в Ni — при $\epsilon > 1,5 \%$, в Al_2O_3 и SiO_2 — при $\epsilon > 2 \%$, в нитевидных кристаллах Cu не было замечено отклонений вплоть до $2,8 \%$ при растяжении и 3% при кручении.

В ряде работ, касающихся главным образом практического использования нитевидных кристаллов, как показал литературный обзор, появились данные, свидетельствующие о том, что модули упругости нитевидных кристаллов ряда керамик (в том числе и Al_2O_3) значительно превосходят модули упругости обычных материалов [25, 26]. Однако последующими исследованиями, как было указано в [27] уже утверждалось, что модули нитевидных кристаллов Al_2O_3 не отличаются по абсолютной величине от модулей макрокристаллов.

Проведенные учеными испытания показали, что предельная прочность нитевидных кристаллов однозначно зависит от их диаметра. В образцах толщиной более $20\text{--}30 \text{ мк}$ она совпадает с прочностью массивных кристаллов и, лишь начиная примерно с 10 мк , быстро возрастает, приближаясь к теоретической прочности материала.

Впервые это было отмечено Дьюлаи в работе [28] на нитевидных кристаллах известного кристалла NaCl:

при уменьшении диаметра от 15–20 мк до 1–2 мк прочность возрастала от 2–4 до 100 кГ/мм². Впоследствии существование такой зависимости было подтверждено на нитевидных кристаллах многих веществ. Опять-таки исследователю Фридману удалось проследить ее до толщины 0,15 мк на нитевидных кристаллах и так называемых щепках LiF, которые образуются при раскалывании ионных кристаллов.

Эти щепки по механическим свойствам подобны нитевидным кристаллам [29–34], однако существенно от них отличаются по ряду других признаков. Именно в щепках избирательным травлением учеными была обнаружена очень высокая плотность дислокаций (до 109 см⁻²). Дислокации располагались как правило вдоль следов скольжения. Это свидетельствовало, в свою очередь, о том, что щепки претерпевали пластическую деформацию в процессе их образования.

Растворимость щепок оказалась значительно выше, чем у нитевидных кристаллов [34]. Некоторые грани поверхности щепок при этом имели грубый рельеф ступеней скола. Причиной разрушения щепок, как показали исследования, часто являлись распространяющиеся с поверхности трещины.

Как показали результаты проведенных исследований, при уменьшении толщины нитевидного кристалла до < 10 мк наблюдалась тенденция к разному возрастанию их прочности, несмотря на значительный разброс данных, однако при этом во всех этих соотношениях средняя прочность линейно зависит от обратной величины диаметра. Такая зависимость соответствует соотношению, даваемому статистической теорией масштабного эффекта.

Идея о статистической природе эффекта повышения прочности тонких нитей кристаллов была впервые выдвинута достаточно давно, в 1933 году Александровым и Журковым в их книге [35] и заключалась во введении представления о том, что зависимость прочности тонких нитей от их толщины обусловлена присутствием различных по действию на прочность дефектов материала, распределенных по всему образцу.

Однако полученные позже для нитевидных кристаллов данные средних прочностей были несколько завышенными, поскольку при испытаниях происходил произвольный отбор наиболее ровных образцов с гладкими и совершенными поверхностями. Масштабный эффект, т. е. повышение прочности кристалла с уменьшением диаметра образцов, наблюдалась при этом как на кристаллических, так и на некристаллических материалах.

Хорошо описана и показана коллективом ученых необычайно высокая прочность тонких стеклянных нитей [36], доходящая до 500 кГ/мм² по сравнению с 4–6 кГ/мм² в обычном стекле. Бережкова Г. В. при этом отмечает, что в относительно недавних работах (1955 г.) [37, 38] на стеклянных волокнах прочностью 280–370 кГ/мм² не было замечено изменений прочности при уменьшении их диаметра от 200 до 50 мк. Это связано с тем, что все нити изготовлялись в строго идентичных условиях, приводящих к очень высокому качеству поверхности.

Если же брать обычные материалы, то в них наблюдалось повышение прочности кристалла с уменьшением диаметра образцов. Например, прочность кристаллов Sb увеличивалась с 0,57–0,77 кГ/мм² для образцов, имеющих диаметр 4 мм, до 15–22 кГ/мм² для образцов диаметром 30 мк, что было описано в [39].

В свою очередь ученые Пирсон, Рид и Фельдман в работах [40, 41] проводили сравнение прочности нитевидных кристаллов Si и образцов тех же размеров, вытравленных из массивных кристаллов Si. Как показали результаты исследований при диаметрах от 50 до 25 мк прочность их заметно не отличалась. Прочность же медных микропроволок диаметром от 3 до 50 мк, полученных травлением 50 мк проволоки, также возросла с уменьшением диаметра, хотя при этом оставалась ниже прочности нитевидных кристаллов того же размера, не превышая 100 кГ/мм², что описано, в свою очередь, в [42].

Именно в [42] было отмечено, что прочность микропроволок значительно медленнее падает с ростом толщины, и эта зависимость сохраняется до диаметров 30 мк (у нитевидных кристаллов до 8–10 мк).

Гольденберг и Бычкова в труде [43] описывали исследования, проведенные на оптически совершенных нитевидных кристаллах NaCl, полученных испарением раствора через коллодиевую пленку, при котором наблюдалось возрастание микротвердости от 55 кГ/мм² для образцов диаметром 100 мк до 90 кГ/мм² для образцов диаметром 25 мк. Величина микротвердости макрокристаллов NaCl составляла при этом 42 кГ/мм².

Масштабный эффект в нитевидных кристаллах для не очень малых диаметров, так же как и в обычных материалах, может быть связан с уменьшением вероятности встретить опасные дефекты на поверхности или внутри образца. Однако вопрос объемных дефектов нитевидных кристаллов достаточно серьезен и будет рассмотрен в рамках продолжения литературного обзора в последующих научных статьях.

5. Выводы

Таким образом, в материале данной статьи были рассмотрены результаты различных ранее проведенных исследований прочностных характеристик различных групп нитевидных кристаллов, проанализированы результаты данных исследований с точки зрения будущности использования кристаллов, более углубленно рассмотрены принципы влияния механических испытаний на структуру кристаллической решетки и свойства нитевидных кристаллов.

Литература

1. Бережкова, Г. В. Нитевидные кристаллы [Текст] / Г. В. Бережкова. — М.: Госиздат, 1969. — 158 с.
2. Gordo, J. E. Endeavour [Text] / J. E. Gordo. — 1964. — № 23. — P. 8.
3. Fraenkel, I. Z. Phys. [Text] / I. Fraenkel. — 1926. — № 37. — P. 572.
4. Zwicky, F. Z. Phys. [Text] / F. Zwicky. — 1923. — № 24. — P. 131.
5. De Boer, J. H. Trans. Faraday Soc. [Text] / J. H. De Boer. — 1936. — № 32. — P. 10.
6. Mackenzie, J. K. Thesis Univ. Bristol [Text] / J. K. Mackenzie. — 1948. — № 11. — P. 21–24.
7. Orowan, E. Proc. Roy. Soc. [Text] / E. Orowan. — 1940. — № 52. — P. 8.
8. Hirth, G. P. Nature [Text] / G. P. Hirth. — 1958. — № 182. — P. 296–299.
9. Вейк, Г. Проблемы современных металлов [Текст] / Г. Вейк. — 1959. — Т. 5. — С. 128.
10. Костюк, В. Г. Физика твердого тела [Текст] / В. Г. Костюк, К. К. Зилинг, А. В. Серебряков // ФТТ. — 1963. — Т. 5. — С. 306–310.

11. Brenner, S. S. Growth and Perfection of Crystals [Text] / S. S. Brenner. — N. Y.: John Wiley, 1959. — № 12. — P. 157.
12. Eisner, R. L. Growth and Perfection of Crystals [Text] / R. L. Eisner. — N. Y.: John Wiley, 1959. — № 21. — P. 191.
13. Серебряков, А. В. Физика твердого тела [Текст] / А. В. Серебряков, В. Г. Костюк, К. К. Зилинг // ФТТ. — 1965. — Т. 7. — С. 858.
14. Brenner, S. S. J. Appl. Phys. [Text] / S. S. Brenner. — 1956. — № 27. — P. 1484.
15. Эйвнер, Р. Л. Кремний [Текст] / Р. Л. Эйвнер. — 1960. — Т. 2. — С. 245.
16. Marsch, D. M. J. Scient. Instrum. [Text] / D. M. Marsch. — 1959. — № 36. — P. 165.
17. Marsch, D. M. J. Scient. Instrum. [Text] / D. M. Marsch. — 1961. — № 38. — P. 229.
18. Надгорный, Э. М. Физика твердого тела [Текст] / Э. М. Надгорный, А. В. Степанов // ФТТ. — 1961. — Т. 3. — С. 1068.
19. Лемке, Ф. Приборы для научных исследований [Текст] / Ф. Лемке, Р. Крафт. — 1962. — Т. 2. — С. 46.
20. Wollers, H. J. Scient. Instrum. [Text] / H. Wollers, W. Schapink. — 1961. — № 38. — P. 250.
21. Cabrera, N. Growth and Perfection of Crystals [Text] / N. Cabrera, P. V. Price. — N. Y.: John Wiley, 1959. — № 3. — P. 204.
22. Brenner, S. S. Rev. Scient. Instrum. [Text] / S. S. Brenner, C. R. Morelok. — 1957. — № 28. — P. 652.
23. Фридман, В. Я. Физика твердого тела [Текст] / В. Я. Фридман. — 1966. — Т. 8. — С. 1079.
24. Price, P. V. Acta metallurgica [Text] / P. V. Price, D. A. Vermilyea, W. W. Webb. — 1958. — № 6. — P. 524.
25. Levell, A. P. Mater. Res. and Standarts [Text] / A. P. Levell. — 1966. — № 6. — P. 64.
26. Бокштейн, С. З. Физика твердого тела [Текст] / С. З. Бокштейн, С. Т. Кишкин, М. П. Назарова, И. Л. Светлов // ФТТ. — 1967. — Т. 9. — С. 1887.
27. Бокштейн, С. З. Физика твердого тела [Текст] / С. З. Бокштейн, Г. Н. Зайцев, М. Й. Назарова, И. Л. Светлов // ФТТ. — 1968. — Т. 10, № 2. — С. 564.
28. Gyulai, Z. Z. Phys. [Text] / Z. Gyulai. — 1954. — № 138. — P. 317.
29. Venables, J. D. Appl. Phys. [Text] / J. D. Venables. — 1963. — № 34. — P. 293.
30. Hulse, O. J. Amer. Ceram. Soc. [Text] / O. Hulse. — 1961. — № 44. — P. 572.
31. Дикина, Л. С. Физика твердого тела [Текст] / Л. С. Дикина, А. А. Шпунт // ФТТ. — 1962. — Т. 4. — С. 556.
32. Стрелков, П. Г. Физика твердого тела [Текст] / П. Г. Стрелков, А. А. Шпунт // ФТТ. — 1962. — Т. 4. — С. 2258.
33. Фридман, В. Я. Физика твердого тела [Текст] / В. Я. Фридман, А. А. Шпунт // ФТТ. — 1963. — Т. 5. — С. 790.
34. Фридман, В. Я. Физика твердого тела [Текст] / В. Я. Фридман, А. А. Шпунт // ФТТ. — 1964. — Т. 6. — С. 489.
35. Александров, А. П. Явление хрупкого разрыва [Текст] / А. П. Александров, С. Н. Журков. — М.: Изд. ГТТИ, 1933. — 215 с.
36. Буров, К. А. Научный журнал ЖТФ [Текст] / К. А. Буров, М. В. Классен-Неклюдова, Г. А. Андриевская, Г. Д. Тенсон, Ю. Е. Томиловский, М. А. Чернышова // ЖТФ. — 1945. — Т. 15. — С. 407.
37. Ollo, W. J. Amer. Ceram. Soc. [Text] / W. Ollo. — 1955. — № 38. — P. 122.
38. Thomas, W. Nature [Text] / W. Thomas. — 1958. — № 181. — P. 1006.
39. Taylor, G. F. Phys. Rev. [Text] / G. F. Taylor. — 1924. — № 23. — P. 655.
40. Pearson, G. L. Acta metallurgica [Text] / G. L. Pearson, W. T. Read, W. L. Feldman. — 1957. — № 5. — P. 181.
41. Read, W. T. Dislocations and Mechanical Properties of Crystals [Text] / W. T. Read, G. L. Pearson. — N. Y. — London: John Wiley, 1957. — P. 537.
42. Parker, R. L. J. Chem. Phys. [Text] / R. L. Parker, S. C. Hardy. — 1962. — № 37. — P. 1606.
43. Гольденберг, С. У. Физика твердого тела [Текст] / С. У. Гольденберг, А. И. Бычкова // ФТТ. — 1967. — Т. 9. — С. 674.

ВЛАСТИВОСТІ НИТКОПОДІБНИХ КРИСТАЛІВ. МЕХАНІЧНІ ВИПРОБУВАННЯ НА МІЦНІСТЬ

Розглянуто результати раніше проведених досліджень міцнісних характеристик різних груп ниткоподібних кристалів, проаналізовано результати досліджень з точки зору практичного використання ниткоподібних кристалів, розглянуто фактори впливу механічних випробувань на структуру кристалічної решітки кристалів та його властивості.

Ключові слова: міцнісні характеристики, ниткоподібні кристали, механічні випробування.

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

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

Artemev Sergey, National University of Civil Protection of Ukraine, Ukraine, e-mail: sergey.artemev.1967@mail.ru

УДК 629.7.054

Бойко Г. В.

ЛИНЕЙНО УПРУГИЙ ПОДВЕС ПОПЛАВКОВОГО ГИРОСКОПА В АКУСТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Строится система дифференциальных уравнений поплавкового подвеса гироскопа в перемещении при отсутствии трансляции энергии изгибного движения оболочечной части на торцы. Изучается трехмерная задача. С целью установления оптимальной геометрии оболочечной части и решения задач оптимизации предполагается произвольное очертание линии меридиана. Как частный случай, вытекают уравнения упругого состояния кругового цилиндра.

Ключевые слова: поплавковый подвес гироскопа, координатные функции, упругое состояние, линия меридиана.

1. Введение

Исследования относятся к области прикладной механики и посвящены изучению возмущенного состояния

поверхности поплавкового подвеса гироскопа в акустической среде. Построенная математическая модель подвижной части подвеса создает возможности для глубокого изучения свойств прибора в натуральных условиях.