

УДК 548.31

DOI: 10.15587/2312-8372.2018.126564

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОЛУЧЕНИЯ НЕПРЕРЫВНЫХ ВОЛОКОН НИТЕВИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ

Артемьев С. Р., Шапорев В. П., Цымбал Б. М.

Объектом данного исследования были некоторые методы получения непрерывных волокон нитевидных кристаллов. Исследован метод получения таких волокон экструзией металлоорганического коллоидного раствора на примере принципиальной схемы проведения такого процесса. На примере другой принципиальной схемы исследован процесс получения волокон методом пиролиза полимерных волокон. К проблемным сторонам проведения обеих процессов и использовании таких методов следует отнести сложность получения нужной конфигурации и ориентации волокон нитевидных кристаллов, а также недостаточное совершенство аппаратуры и установок получения таких волокон. При написании работы использовались различные методы научных исследований, такие как метод статистического анализа, метод анализа результатов исследований, гипотетико-дедуктивный метод и метод обобщения результатов. Проведенные исследования показали, что условия проведения обеих процессов должны строго контролироваться, особенно подъем температуры. Показано, что применяемые методы имеют повышенную степень опасности. Обосновано, что, несмотря на соблюдение всех параметров проводимых процессов, может быть не исключен тот факт, что итоговые волокна кристаллов не будут иметь нужной ориентации и конфигурации. В результате проведенных исследований показано, что получение непрерывных волокон нитевидных кристаллов методом экструзии металлоорганического коллоидного раствора достаточно эффективно с точки зрения получения итогового продукта нужной ориентации и необходимых параметров. Эффективность данного метода может быть повышена, если успешно использовать процессы легирования волокон из газовой фазы. Показано, что при проведении исследований получения аналогичных волокон методом пиролиза можно иметь высокую эффективность завершеного процесса при полном соблюдении параметров его проведения и достаточном совершенстве оборудования. Достаточно существенным вопросом при использовании именно данного метода является максимально эффективное проведение процесса натяжения непрерывных волокон нитевидных кристаллов в процессе термообработки.

Ключевые слова: методы получения нитевидных кристаллов, непрерывные волокна, металлоорганический раствор.

1. Введение

Первой монографией, которая была посвящена именно методам и методикам получения нитевидных кристаллов, была работа [1]. Сегодня можно

с уверенностью сказать, что эта монография была первой монографией в российской литературе и одной из первых в мировой, – которая обобщала бы вопросы результатов экспериментов, используемых методов и методик проведения исследований нитевидных кристаллов. Это было сравнительно недавно и следует отметить, что сейчас проблема исследования методов получения нитевидных кристаллов продолжает оставаться достаточно актуальной.

По данной проблематике основная масса материала все же продолжает публиковаться в журналах, материалах конференций и симпозиумов. Поэтому достаточно сложно на основании большого количества источников информации выделить главные обобщающие стороны проводимых процессов и результатов проведенных исследований.

Многогранность и значительное расширение спектра использования различных наноструктур уже не вызывает сомнений. Объемы продаж продуктов нанотехнологий, где широко используются нитевидные кристаллы, уже составляют миллиарды долларов (электронные приборы, транзисторы, процессоры, ультрафиолетовая и рентгеновская оптика и др.).

Поэтому тенденции детального изучения методик и методов получения различных групп нитевидных кристаллов и их волокон приобретают все более и более широкое распространение.

2. Объект исследования и его технологический аудит

Объектом данного исследования являются некоторые методы получения непрерывных волокон нитевидных кристаллов.

Был рассмотрен метод экструзии металлоорганического коллоидного раствора, который в современных условиях широко используется с целью получения керамических волокон, которые имеют поликристаллическую структуру. Данный метод был проанализирован на примере типового технологического процесса, который осуществлялся согласно принципиальной схеме получения керамического волокна алюмооксида.

Относительно другой схемы рассматривался метод пиролиза полимерного волокна, который служит в основном для получения углеродных волокон. Рассматривая технологический процесс получения данного вида волокон, было указано, что в его основе лежит термическое разложение таких волокон при полном контроле прохождения процесса. Был проведен анализ строения углеродородного волокна кристалла и проанализирована его структура.

Слабыми (проблемными) сторонами обеих проводимых процессов при использовании указанных методов является вопрос контроля проведения регламента и достаточно высокие риски проводимых операций при их достаточной простоте. Следует отметить, что структура получаемых данными методами кристаллов полностью зависит от показателей регламента, что приводит к сложности получения кристаллов определенной структуры и ориентации.

3. Цель и задачи исследования

Цель исследования – обзор существующих представлений о некоторых методах получения непрерывных волокон нитевидных кристаллов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить такие задачи:

1. Исследовать метод экструзии металлоорганического коллоидного раствора, а также технологию проведения данного процесса и определить слабые и сильные стороны его проведения.
2. Исследовать метод пиролиза полимерного волокна, изучить строение углеродного волокна, его структуру, позитивные и проблемные стороны осуществления регламента процесса.

4. Исследование существующих решений проблемы

Как было указано ранее, в конце 20-го века было крайне малое количество обобщенных источников информации (монографий) по проблеме исследования. Методы и методики получения различных групп нитевидных кристаллов описывались и публиковались достаточно разобщенно. Однако сказать, что материала было мало, конечно же, нельзя. Проблема описывалась, обговаривалась, исследовалась и пути ее решения находились.

По нитевидным кристаллам сложностью является не только их получение и выращивание, а и, что самое важное, получение нужного результата и нужной структуры кристалла, его необходимой ориентации. Получить кристалл нужной структуры и нужной ориентации – это практически 80 % затрат, усилий и изобретательности ученого [2].

Контроль проведения процессов, четкое соблюдение всех операций при любом методе получения нитевидных кристаллов – самое главное достоинство любого применяемого метода и методики [3, 4].

В первой половине 20-го века начали применяться контейнерные методы выращивания различных групп нитевидных кристаллов, применялись магнитные поля с целью увеличения роста кристалла, про что было указано в [5–8].

Вопросы «вытягивания» или «натяжения» кристаллов, которые стали применяться во многих методах (в частности, метод Чохральского) описаны в [9–12].

Использование электрического поля при выращивании нитевидных кристаллов и процессы получения кристаллов из различных групп расплавленных металлов подробно описывались в [13–15], что было обобщено в [16, 17]. Хотя следует отметить, что были и противники применения методов электроосаждения при выращивании нитевидных кристаллов, что, в частности, указано в [18].

На выращивание кристаллов большое влияние оказывает чистота самого кристалла. При применении, например, метода электронно-лучевого нагрева данный фактор оказывает решающее воздействие [19].

В литературе отображены и другие методы получения нитевидных кристаллов, например, с использованием дуговых печей [20, 21], с применением лазеров [22] и индукционного нагрева [23, 24].

В [25–30] был проведен анализ методов получения нитевидных кристаллов с помощью химических реакций восстановления галоидных солей металлов.

В [31–34] представлены обобщающие материалы конференций, где рассматривались вопросы областей применения нитевидных кристаллов.

Определенный обобщенный материал по анализу существующих методов получения нитевидных кристаллов имел место в [35, 36], а вот относительно исследования различных свойств нитевидных кристаллов речь велась, в частности в:

- [37, 38] – об исследованиях механических свойств нитевидных кристаллов;

- [39] – о нетрадиционных методах выращивания нитевидных кристаллов;

- [40] – о традиционных методах выращивания нитевидных кристаллов;

- [41] – о методах исследования нитевидных кристаллов в композиционном материале;

- [42, 43] – о свойствах и способах получения нитевидных кристаллов различных групп (обобщенный литературный обзор).

Таким образом, результаты проведенного анализа позволяют сделать вывод о том, что вопросам исследования существующих методов получения нитевидных кристаллов и их волокон уделялось достаточно широкое внимание. Однако и на сегодняшний день систематизированных источников по данной проблеме достаточно небольшое количество.

5. Методы исследований

В ходе исследований были использованы следующие методы:

- статистического анализа (для определения динамики изменения подходов в совершенствовании методов получения непрерывных волокон нитевидных кристаллов);

- анализа результатов исследований (для определения позитивных изменений и проблемных вопросов применения того или иного метода получения непрерывных волокон нитевидных кристаллов);

- гипотетико-дедуктивный метод (при ознакомлении фактического материала исследований в области получения непрерывных волокон нитевидных кристаллов, которые дополнительно требуют углубленного анализа дополнительных источников информации);

- метод обобщения результатов (для установления общих свойств и тенденций, характерных исследуемым методам получения непрерывных волокон нитевидных кристаллов).

6. Результаты исследований

6.1. Метод экструзии металлоорганического коллоидного раствора (суспензии)

Следует отметить, что данный метод используется с целью получения керамических волокон, которые имеют поликристаллическую структуру.

В целом технологический процесс получения данной группы волокон состоит из следующих операций:

1. Приготовление коллоидного раствора соответствующего соединения.
2. Экструзия раствора с целью формирования нужных непрерывных волокон нитевидных кристаллов.
3. Удаление из полученного волокна нехарактерных соединений с помощью обжига. Данная операция в целом способствует стабилизации состава и структуры полученного волокна нитевидного кристалла и создает нужную степень его уплотнения.

В работе на примере принципиальной схемы рассмотрен процесс получения керамического волокна алюмооксида (показано на рис. 1). Для изготовления данного непрерывного волокна изначально, как указано в первой операции, приготавливался коллоидный раствор, в данном случае – это 50 % водный раствор формоацетата алюминия – $\text{Al}(\text{OH})(\text{CHO}_2)(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)$.

После приготовления такого раствора его вакуумируют, заливают в емкость (2) и под давлением 1–1,2 атм. подают азот. Азот подается из баллона (1). В дальнейшем коллоидный раствор попадает на насос (3), который служит для поддержания нужного давления во всем трубопроводе. Давление фиксируется по манометру (4). Через фильтр (5) осуществляется очистка от твердых частиц. В дальнейшем очищенный коллоидный раствор попадает на фильтры (7) через трубопровод.

Для поддержания нужной вязкости раствора в трубопроводе создается изотермическая баня (6). Фильтры представляют собой стаканы диаметром 12 мм с толщиной дна до 4–5 мм, где находится 12–15 отверстий диаметром 127 мкм для образования волокон. Волокна, проходя через данные фильтры, попадают в нагретый от калорифера (8) воздух, в результате чего происходит процесс испарения воды и образование достаточно твердого непрерывного волокна.

Волокно в дальнейшем проходит через барабан (9), наматывается на него, вытягивается, в результате чего происходит изменение размера его диаметра до 10–20 мкм. Волокно в дальнейшем обжигается при температуре до 1500 °С. Следует отметить, что сам процесс нагревания волокна происходит постепенно и достаточно медленно, благодаря чему волокно эффективно теряет свою органическую составляющую.

Следует также обратить внимание на тот факт, что для проведения такого процесса достаточно температуры до 600–700 °С. В структуре волокна при этом остается аморфный оксид алюминия.

Позже происходит медленное нагревание волокна до 950 °С, которое приводит к образованию γ -модификации Al_2O_3 . Данная модификация в дальнейшем при нагреве до 1100–1200 °С и выше превращается в α - Al_2O_3 [44].

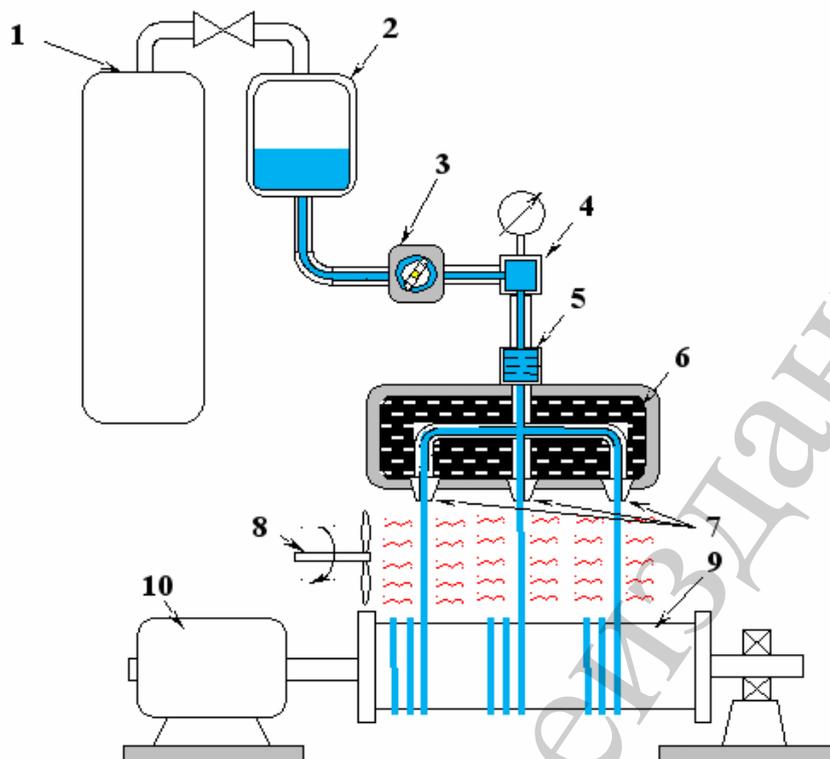


Рис. 1. Схема установки получения волокон поликристаллической структуры:
 1 – баллон (с азотом); 2 – резервуар; 3 – насос; 4 – манометр; 5 – фильтр;
 6 – изотермическая баня, 7 – фильтры; 8 – калорифер; 9 – барабан;
 10 – двигатель

Как видно из описания процесса работы указанной выше схемы основным фактором является фактор постепенного увеличения температуры и отслеживания параметров изменения ориентации волокон.

6.2. Метод пиролиза полимерного волокна

Данный метод также имеет определенную направленность и служит в основном для получения углеродных волокон. Материалом, который в данном методе используется как сырье, являются в основном синтетические или целлюлозные волокна. Данный вид волокон в достаточном количестве используются на предприятиях текстильной промышленности. Менее часто, но все же, как сырье могут использоваться и смолы.

Как и в первом случае, волокна также могут быть получены, проходя через фильтры (продавливаясь через них). Однако главным условием при этом является то, что полимер должен находиться в постоянно-вязком состоянии.

Рассматривая технологический процесс получения данного вида волокон (углеродных) следует отметить, что в его основе лежит термическое их разложение при полном контроле прохождения процесса. Это, прежде всего, определяется опасностью процесса. Температура нагрева в среднем составляет до 3000 °С. Среда процесса – инертная, в результате процесса происходит пиролиз, разложение и кристаллизация углерода с образованием связей C=C.

На рис. 2 показано углеродное волокно, его строение. В целом оно представляет собой несколько сотен (иногда и тысяч) фибрилл, которые ориентированы по оси волокна [44].

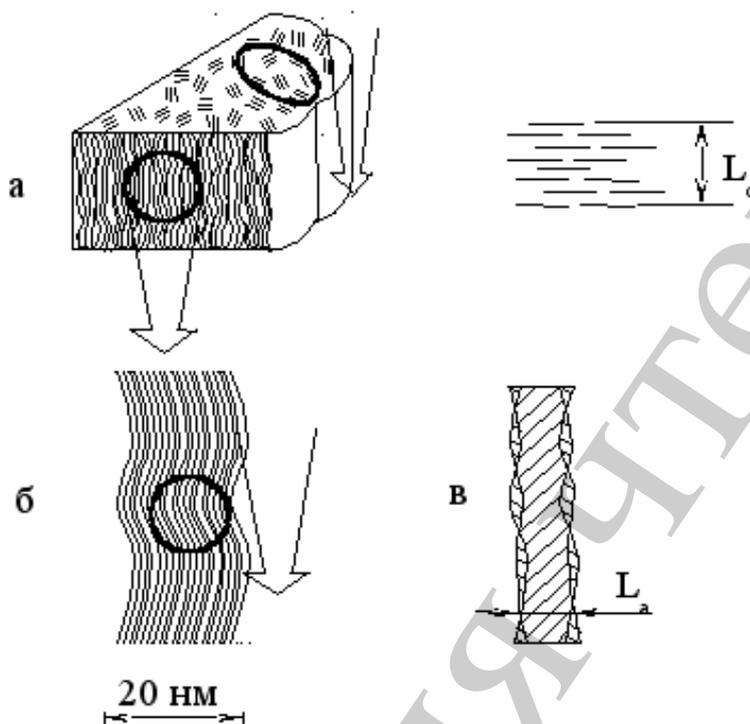


Рис. 2. Схема строения углеродных волокон:

a – общий вид волокна; *б* – продольное сечение фибриллы; *в* – микрофибриллы (L_a и L_c – линейные размеры микрофибрилл)

Структура самого волокна из углерода в целом достаточно похожа на структуру исходного полимера. Фибрилла состоит из лентообразных слоев конденсированного углерода (показано на рис. 2, *б*). На рис. 2, *в* показано, что микрофибриллы разделены порами. При этом ориентация, как фибрилл, так и микрофибрилл практически одинакова.

Процесс образования углеродных волокон включает следующие операции:

1. Нагрев до температуры 120–150 °С с целью удаления воды.
2. Последующий медленный нагрев до температуры 180–240 °С для удаления групп –ОН и образования связей С=С.
3. Продолжение нагрева уже до температуры 380 °С с целью расщепления целлюлозных колец
4. Дальнейший нагрев до температуры в 650–700 °С для образования графитоподобных колец. На этой стадии проводится натяжение нитей с целью получения нужной ориентации кристаллов.
5. Процесс графитизации при температуре до 2000 °С.

Однако следует отметить, что не все процессы данного метода являются однотипными и не все виды волокон получаются аналогично. Многие из них необходимо поддавать выдержке.

Так, например, при термической обработке полиакринитрильных волокон процесс их получения выглядит вот так:

1. Нагрев до температуры 220 °С и выдержка до 20 часов.
2. Достаточно резкое увеличение температуры до 950–1000 °С в атмосфере водорода и выдержка, как правило, в течение суток.
3. Увеличение температуры до 2000–2400 °С на протяжении 1,5–2 часов и процесс натяжения в течение 15–20 минут давлением в 3–4 МПа.
4. Процесс графитизации на протяжении до 20 минут при температуре 2700–2900 °С.

Выводы достаточно большого количества экспериментальных исследований показали, что вопрос повышения прочности углеродных волокон при проведении такого процесса достаточно перспективен.

7. SWOT-анализ результатов исследований

Strengths. В результате применения метода экструзии металлоорганической суспензии (коллоидного раствора), безусловно, сильными сторонами являются:

- 1) эффективность и простота установки;
- 2) простота проведения процесса приготовления суспензии из металлоорганического соединения;
- 3) неизменность показателей вязкости при проведении процесса;
- 4) дополнительное натяжение волокон приводит к уменьшению диаметра отверстий фильер, что в сочетании с повышением температуры способствует созданию различных модификаций волокон нитевидных кристаллов;
- 5) показатели предела прочности на разрыв, получаемых при данном методе получения волокон, достаточно существенны.

В результате применения метода пиролиза полимерных волокон сильными сторонами являются:

- 1) сырье достаточно дешево и при этом эффективно в использовании;
- 2) исходные органические волокна получают выдавливанием через фильеры соответствующего полимера в вязкотекучем состоянии (не сложный процесс);
- 3) структуры волокон кристаллов изменяются благодаря постоянному повышению температуры (однотипность процесса);
- 4) полученные углеродные волокна имеют высокие механические свойства при небольшой плотности.

Weaknesses. К недостаткам проведения исследуемых процессов можно отнести следующие:

- 1) условия проведения процессов должны строго контролироваться, особенно временные показатели подъема температуры;
- 2) опасность и риски проведения процессов существенны;

3) структура полученных кристаллов полностью зависит от показателей регламента, что приводит к сложности получения кристаллов определенной структуры и ориентации.

Opportunities. Проведенные исследования получения непрерывных волокон нитевидных кристаллов методом экструзии показали, что данный метод достаточно эффективен с точки зрения получения необходимой конфигурации и модификации волокон нитевидных кристаллов. При достаточно контролируемом и четком соблюдении параметров проводимых процессов в большинстве случаев можно сохранить нужные свойства и показатели конечного продукта волокна нитевидного кристалла.

Threats. К проблемным сторонам однозначно следует отнести сложность получения нужной конфигурации и ориентации волокон нитевидных кристаллов и недостаточное совершенство аппаратуры и установок получения такого рода волокон.

8. Выводы

1. Проведено исследование получения непрерывных волокон нитевидных кристаллов методом экструзии металлоорганического коллоидного раствора. Показано, что использование данного метода достаточно эффективно с точки зрения получения итогового продукта нужной ориентации и необходимых параметров. Эффективность данного метода может быть повышена, если успешно использовать процессы легирования волокон из газовой фазы.

2. При проведении метода пиролиза для получения непрерывных волокон показано, что применение данного метода может иметь высокую эффективность завершеного процесса при полном соблюдении параметров процесса, достаточном совершенстве оборудования при достаточной несложности и простоте процесса. Достаточно существенным вопросом при проведении именно данного метода является максимально эффективное использование процесса натяжения непрерывных волокон нитевидных кристаллов в процессе термообработки.

References

1. Gusev A. I. Nanokristallicheskie materialy. Metody polucheniya i svoystva. Moscow: FIZMATLIT, 1998. 248 p.

2. Les Elements Des Terres Rares. Vol. 1 / Spedding F. H. et al. Editions du Centre Nat. de la Recherche Scientifique, 1970. P. 25.

3. Chalmers B. Principles of Solidification. New York: Wiley, 1964. 319 p.

4. Liquid Metals and Solidification. Cleveland: American Society for Metals, 1958. 348 p.

5. Gow K. V., Chalmers B. The preparation of high melting point metal single crystals and bicrystals with pre-determined crystallographic orientation // British Journal of Applied Physics. 1951. Vol. 2, No. 10. P. 300–303. doi:[10.1088/0508-3443/2/10/305](https://doi.org/10.1088/0508-3443/2/10/305)

6. Hurle D. T. J. Temperature oscillations in molten metals and their relationship to growth striae in melt-grown crystals // *Philosophical Magazine*. 1966. Vol. 13, No. 122. P. 305–310. doi:[10.1080/14786436608212608](https://doi.org/10.1080/14786436608212608)
7. Utech H. P., Flemings M. C. Elimination of Solute Banding in Indium Antimonide Crystals by Growth in a Magnetic Field // *Journal of Applied Physics*. 1966. Vol. 37, No. 5. P. 2021–2024. doi:[10.1063/1.1708664](https://doi.org/10.1063/1.1708664)
8. Nacken R., Neues J. B. Über das Wachstum von Kristallpolyedern in ihrem Schmelzfluß // *Mineralog. Geol. Palaontol. Ref. Teil*. 1915. No. 2. P. 133–164.
9. Kyropoulos S. Ein Verfahren zur Herstellung großer Kristalle // *Zeitschrift Für Anorganische Und Allgemeine Chemie*. 1926. Vol. 154, No. 1. P. 308–313. doi:[10.1002/zaac.19261540129](https://doi.org/10.1002/zaac.19261540129)
10. Czochralski J. Ein neues Verfahren zur Messung des Kristallisationsgeschwindigkeit der Metalle // *Zeitschrift für Physikalische Chemie*. 1918. Vol. 92. P. 219.
11. Sworn C. H., Brown T. E. The growth of dislocation-free copper crystals // *Journal of Crystal Growth*. 1972. Vol. 15, No. 3. P. 195–203. doi:[10.1016/0022-0248\(72\)90119-4](https://doi.org/10.1016/0022-0248(72)90119-4)
12. Howe S., Elbaum C. The occurrence of dislocations in crystals grown from themelt // *Philosophical Magazine*. 1961. Vol. 6, No. 70. P. 1227–1240. doi:[10.1080/14786436108243373](https://doi.org/10.1080/14786436108243373)
13. Hukin D. A. The Levitational Zone Refining (LZR) of photovoltaic silicon // *Journal of Crystal Growth*. 1990. Vol. 104, No. 1. P. 93–97. doi:[10.1016/0022-0248\(90\)90314-b](https://doi.org/10.1016/0022-0248(90)90314-b)
14. Carlson O. N., Schmidt F. A., Peterson D. T. Electrotransport of interstitial atoms in yttrium // *Journal of the Less Common Metals*. 1966. Vol. 10, No. 1. P. 1–11. doi:[10.1016/0022-5088\(66\)90038-5](https://doi.org/10.1016/0022-5088(66)90038-5)
15. Schmidt F. A., Warner J. C. Electrotransport of carbon, nitrogen and oxygen in vanadium // *Journal of the Less Common Metals*. 1967. Vol. 13, No. 5. P. 493–500. doi:[10.1016/0022-5088\(67\)90084-7](https://doi.org/10.1016/0022-5088(67)90084-7)
16. Peterson D. T., Schmidt F. A. Electrotransport of carbon, nitrogen and oxygen in lutetium // *Journal of the Less Common Metals*. 1969. Vol. 18, No. 2. P. 111–116. doi:[10.1016/0022-5088\(69\)90129-5](https://doi.org/10.1016/0022-5088(69)90129-5)
17. Peterson D. T., Schmidt F. A. Preparation of high purity thorium and thorium single crystals // *Journal of the Less Common Metals*. 1971. Vol. 24, No. 2. P. 223–228. doi:[10.1016/0022-5088\(71\)90099-3](https://doi.org/10.1016/0022-5088(71)90099-3)
18. Bradley A. J. CX. The allotropy of manganese // *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*. 1925. Vol. 50, No. 299. P. 1018–1030. doi:[10.1080/14786442508628546](https://doi.org/10.1080/14786442508628546)
19. Mills D., Craig G. Etching dislocations in zirconium // *Journal of Electrochemical Technology*. 1966. Vol. 4. P. 300.
20. Field W. G., Wagner R. W. Thermal imaging for single crystal growth and its application to ruby // *Journal of Crystal Growth*. 1968. Vol. 3–4. P. 799–803. doi:[10.1016/0022-0248\(68\)90270-4](https://doi.org/10.1016/0022-0248(68)90270-4)
21. Drabble J. R. The arc transfer process of crystal growth // *Journal of Crystal Growth*. 1968. Vol. 3–4. P. 804–807. doi:[10.1016/0022-0248\(68\)90271-6](https://doi.org/10.1016/0022-0248(68)90271-6)

22. Gasson D. B., Cockayne B. Oxide crystal growth using gas lasers // Journal of Materials Science. 1970. Vol. 5, No. 2. P. 100–104. doi:[10.1007/bf00554627](https://doi.org/10.1007/bf00554627)
23. Precht W., Hollox G. E. A floating zone technique for the growth of carbide single crystals // Journal of Crystal Growth. 1968. Vol. 3–4. P. 818–823. doi:[10.1016/0022-0248\(68\)90274-1](https://doi.org/10.1016/0022-0248(68)90274-1)
24. Esenski B., Khartman E. Nekotorye zamechaniya o roste i mekhanicheskikh svoystvakh nitevidnykh kristallov NaCl // Kristallografiya. 1962. Vol. 7. P. 433–436.
25. Glester H. Materials with ultra-fine grain size // Deformation of Polycrystals: Mechanisms and Microstructures. Roskilde: Ris. Nat. Laboratory, 1981. P. 21.
26. Glester H., Marquardt P. Nanocrystalline structures – on approach to new materials // Zeitschrift fur Metallkunde. 1984. Vol. 75, No. 4. P. 263–267.
27. Biiringer R., Herr U., Gleiler H. Nanocrystalline materials: a first report // Trans. Japan/Inst. Met. Suppl. 1986. Vol. 27. P. 43–52.
28. Gleiter H. Nanocrystalline materials // Progress in Materials Science. 1989. Vol. 33, No. 4. P. 223–315. doi:[10.1016/0079-6425\(89\)90001-7](https://doi.org/10.1016/0079-6425(89)90001-7)
29. Siegel R. W., Hahn H. Nanophase materials // Current Trends in Physics of materials. Singapore: World Sci. Publ. Co, 1987. P. 403–420.
30. Siegel R. W. What do we really know about the atomic-scale structures of nanophase materials? // Journal of Physics and Chemistry of Solids. 1994. Vol. 55, No. 10. P. 1097–1106. doi:[10.1016/0022-3697\(94\)90127-9](https://doi.org/10.1016/0022-3697(94)90127-9)
31. Nitevidnye kristally i tonkie plenki: proceedings // Nitevidnye kristally. Voronezh: VPI, 1975. 466 p.
32. Nitevidnye kristally dlya novoy tekhniki: proceedings. Voronezh: VPI, 1979. 231 p.
33. Nitevidnye kristally i neferromagnitnye plenki: proceedings // Part 1. Nitevidnye kristally. Voronezh: VPI, 1970. 287 p.
34. Nitevidnye kristally i neferromagnitnye plenki: proceedings // Part 2. Tonkie plenki. Voronezh: VPI, 1970. 300 p.
35. Artemev S. R. Present concepts of non-traditional methods of growing of metal whisker crystals. Pulling of whiskers from solution // Technology Audit and Production Reserves. 2015. Vol. 3, No. 4 (23). P. 8–12. doi:[10.15587/2312-8372.2015.42409](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2015.42409)
36. Artemev S. R. Current concepts of non-traditional methods of cultivation metal whisker crystals. Pulling whisker pole from melt // Technology Audit and Production Reserves. 2015. Vol. 2, No. 4 (22). P. 16–19. doi:[10.15587/2312-8372.2015.40499](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2015.40499)
37. Artemev S. R. Properties of whiskers. mechanical strength test // Technology Audit and Production Reserves. 2013. Vol. 6, No. 1 (14). P. 4–7. doi:[10.15587/2312-8372.2013.19533](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2013.19533)
38. Artemev S. R., Andronov V. A., Semkiv O. M. Mechanical properties of whiskers // Technology Audit and Production Reserves. 2013. Vol. 5, No. 1 (13). P. 42–44. doi:[10.15587/2312-8372.2013.18393](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2013.18393)

39. Artemev S. R. Study of whiskers' mechanical properties. creep and internal friction // Technology Audit and Production Reserves. 2014. Vol. 5, No. 3 (19). P. 16–18. doi:[10.15587/2312-8372.2014.27909](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2014.27909)

40. Artemev S. R. Present concepts of non-traditional methods of growing of metal whisker crystals. Pulling of whiskers from solution // Technology Audit and Production Reserves. 2015. Vol. 3, No. 4 (23). P. 8–12. doi:[10.15587/2312-8372.2015.42409](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2015.42409)

41. Artemev S. R. Analysis of existent concepts of traditional methods of metal whiskers growing. Deposition of substance from the gas phase // Technology Audit and Production Reserves. 2016. Vol. 3, No. 3 (29). P. 34–37. doi:[10.15587/2312-8372.2016.70512](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2016.70512)

42. Artemev S. R., Shaporev V. P., Tsymbal B. M. Investigation of methods of obtaining whiskers in composite material // Technology Audit and Production Reserves. 2018. Vol. 1, No. 3 (39). P. 8–14. doi:[10.15587/2312-8372.2018.124287](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.124287)

43. Artemev S. R., Belan S. V. Properties and basic methods of receipt of threadlike crystals // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2013. Vol. 5, No. 1 (65). P. 22–26. URL: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/18160>

44. Ivanov D. A., Sitnikov A. I., Shlyapin D. S. Dispersnouprochnennye voloknistye i sloistye neorganicheskie kompozitsionnye materialy. Moscow, 2010. 220 p.

Не являється первинним джерелом