

УДК 548.31

С. Р. АРТЕМЬЕВ, В. П. ШАПОРЕВ

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОЛУЧЕНИЯ НЕПРЕРЫВНЫХ ВОЛОКОН НИТЕВИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ

В статье анализируются некоторые методы получения непрерывных волокон нитевидных кристаллов, а именно – метод волочения и метод вытяжки (Тейлора). Представлены схематические описания проведения обеих процессов, обращено внимание на качественные показания полученных итоговых результатов. Проанализированы технологические операции, которые составляют методику проведения процесса волочения и роль каждой из них. Представлены итоговые показатели прочности кристалла в зависимости от его вида при проведении обеих методов получения. Полученные результаты могут быть использованы в широком спектре применения различных групп нитевидных кристаллов, в том числе в вопросах охраны окружающей среды.

**Ключевые слова:** нитевидные кристаллы, метод волочения, метод Тейлора, прочность кристалла, термическая обработка.

У статті проведено аналіз деяких методів отримання безперервних волокон ниткоподібних кристалів, а саме – метод волочіння та метод витягання (Тейлора). Надано схематичний опис проведення обох процесів, зосереджено увагу на якісних показниках отримання підсумкових результатів. Проаналізовано операції технологічного процесу, які є складовою частиною методики проведення процесу волочіння, вказана роль кожної з операцій. Представлено підсумкові показники міцності кристалу залежно від його виду під час здійснення обох методів отримання. Отримані результати можуть бути використані у широкому спектрі застосування різних груп ниткоподібних кристалів, у тому числі і в питаннях охорони довкілля.

**Ключові слова:** ниткоподібні кристали, метод волочіння, метод Тейлора, міцність кристалу, термічна обробка.

In the second half of past century scientists more often began to speak to the questions of lead through of researches of such group of crystals, as threadlike. And if before it more touched foreign sources, in the USSR this question becomes more actual exactly in the indicated interval of time, not going down and to today. First, the so called, theoretical durability of threadlike crystals was expected practically 90 years back and remains actual until now. First, the so-called, theoretical durability of threadlike crystals was expected practically 90 years back and remains actual until now. The conducted literary review rosined on that in the certain amount of scientific editions, in most foreign, the questions of lead through of mechanical researches of threadlike crystals are represented. One methods of receipt of continuous fibres of threadlike crystals are analysed in the article, namely – the method of dragging and method is you-severe (Teylora). Schematic descriptions of lead through of both processes are presented, paid regard to high-quality testimonies the got aggregate results. Technological operations are analysed, this make the method of lead through of process of dragging and roll each of them. The total scores of durability of crystal are presented depending on his kind during the lead through of both methods of receipt. Can be drawn on the got results in the wide spectrum of application of the once-personal groups of threadlike crystals, including in the questions of guard of environment.

**Keywords:** threadlike crystals, method of dragging, method of Teylora, durability of crystal, heat treatment.

**Введение.** Ни для кого не является секретом тот факт, что нитевидные кристаллы обладают рядом свойств, которые существенно отличают их, например, от макрокристаллов. В первую очередь, хочется обратить внимание на упругость и прочность [1]. Следует заметить тот факт, что оценка данной группы свойств нитевидных кристаллов была углубленно проведена лишь в середине прошлого века [2].

В данной научной статье анализируются методы получения непрерывных волокон нитевидных кристаллов именно с точки зрения показателей их прочности. За основу анализа взяты методы волочения и метод вытяжки. Представлены схематические описания проведения обеих процессов, обращено внимание на качественные показания полученных итоговых результатов. Проанализированы технологические операции, которые составляют методику проведения указанных процессов и роль каждого из них. Представлены практические показатели прочностей различных кристаллов при использовании обеих методов.

**Анализ литературных данных и постановка проблемы.** Во второй половине прошлого столетия ученые все более часто стали обращаться к вопросам проведения исследований такой группы кристаллов, как нитевидные. И если ранее это более касалось зарубежных источников, то в СССР данный вопрос становится более актуальным именно в указанный промежуток времени, не снижаясь и до сегодняшнего дня.

Впервые, так называемая, теоретическая прочность нитевидных кристаллов была рассчитана практически 90 лет назад [3] и в дальнейшем данный вопрос нашел свое отражение в различных источниках и, в частности, в [4, 5].

Проведенный литературный обзор 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. Она 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]. При проведении исследований учеными были получены различные значения прочностей различных групп нитевидных кристаллов, в том числе и металлических, что отображено было в таких источниках как [6,7]. В то время как впрочем, и сейчас основная задача была сведена к получению такого значения прочности, которое было бы близко к, так называемому, «теоретическому».

Однако следует заметить, что такое получалось не часто, но было. В частности, проведенный обзор показал, что в решении проблемы увеличения показателя прочности данной группы кристаллов существенное значение имели работы советского ученого А.В. Степанова, который еще в 50-х годах прошлого столетия разработал физическую теорию разрушения периодически неоднородных анизотропных сред.

Если говорить о данной группе кристаллов, то помимо прочности они имеют еще и достаточно мощное сопротивление образованию трещин, высокую стойкость при проведении химических процессов взаимодействия, что было, в частности, указано в [8].

© С. Р. Артемьев, В. П. Шапоров. 2016

Именно для данной группы кристаллов прочность, причем уникально высокая – является наиболее важным свойством, которая в разы превосходит такую же прочность, например, у монокристаллов и поликристаллов. Данный показатель, прежде всего, объясняется совершенством структуры нитевидного кристалла и меньшим количеством различных дефектов [9 – 13].

Если анализировать источники последних 10 лет, то следует отметить, что указанные вопросы рассматривались во время проведения научных конференций и семинаров, что указано в [14 – 16].

Именно поэтому с позиции показателя прочности рассматриваются методы получения непрерывных волокон нитевидных кристаллов в данной статье.

**Цели и задачи исследования.** Целью данной научной статьи является проведение анализа таких методов получения непрерывных волокон нитевидных кристаллов, как метод волочения и метод вытяжки (Тейлора).

Задачи статьи:

1. Описание проведения обеих процессов с позиции получения качественных показателей прочности кристаллов.

2. Анализ технологических операций, которые составляют методику проведения процесса волочения и роль каждой из них.

3. Исследование использования метода порошковой металлургии в процессе получения различных проволок нитевидных кристаллов.

**Анализ методов волочения и вытяжения (Тейлора) в процессах получения непрерывных волокон нитевидных кристаллов.** Волочением получают высокопрочные металлические проволоки, являющиеся одним из самых распространенных видов непрерывных волокон, применяемых для армирования матриц различных композитов.

Волочение – это процесс обработки давлением, в ходе которого пластическая деформация исходной заготовки (2) (в холодном или горячем состоянии) осуществляется за счет ее протягивания через постоянно сужающееся отверстие в инструменте (1), называемом волокой или фильерой (рис. 1) [17].

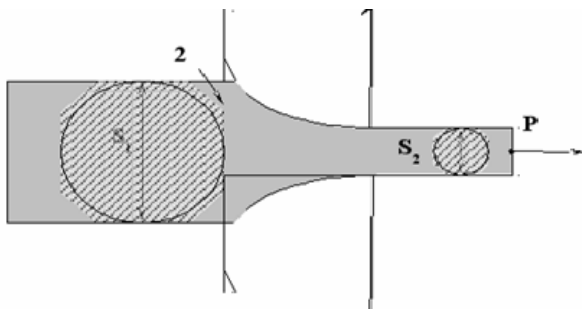


Рис. 1 – Схематическое изображение процесса волочения: 1 – фильера (волока), 2 – заготовка (пруток),  $S_1$  и  $S_2$  – площадь поперечного сечения прутка до и после волочения,  $\rightarrow$  – направление приложения усилия  $P$  для волочения.

Ее, как правило, изготавливают из твердого сплава. При волочении площадь поперечного сечения ( $S$ ) заготовки уменьшается, а длина увеличивается. Отношение величины  $S$  до волочения к таковому зна-

чению после волочения называется коэффициентом вытяжки.

Стальные проволоки изготавливают путем реализации следующих последовательных операций:

1. Термическая обработка заготовки (прутка или катанки) для устранения наклепа, полученного ею при прокатке.

2. Щелочно-кислотное травление для удаления с поверхности оксидов (окалины).

3. Нанесение смазочного покрытия.

4. Непосредственно «волочение».

5. Термообработка для придания проволоке дополнительного упрочнения или пластичности.

Высокоуглеродистые стальные проволоки после волочения могут иметь предел прочности на разрыв 2800 – 3000 МПа. Однако их высокая прочность сохраняется лишь до температуры 200 – 250 °С. При дальнейшем ее повышении прочность таких проволок резко уменьшается.

В этом случае целесообразно применять проволоки из мартенситно-старееющих и нержавеющих сталей. Скорость волочения стальной проволоки может составлять 30 – 120 м /мин. при давлении обжатия 25 – 75 МПа.

В частности проволоки из вольфрама и молибдена получают методами порошковой металлургии [18]. Для этого из указанных металлических порошков прессуют штабики под давлением 400 – 600 МПа и 320 – 370 МПа – для вольфрама и молибдена соответственно. Порошки перед прессованием увлажняются небольшим количеством глицерина в спирте для лучшей прессуемости. Сечение штабиков составляет от 8 x 8 до 40 x 40 мм, а длина может варьироваться от 280 до 600 мм.

Далее их спекают при температуре 1000 – 1300 °С в атмосфере сухого водорода. При этом снимаются внутренние напряжения, заложенные на этапе прессования, выгорает добавка глицерина, а также восстанавливаются оксидные пленки на поверхности частиц металла.

Затем получают заготовки с минимальной пористостью (5 – 15 %) путем высокотемпературного спекания (также называемого сваркой) штабиков в водороде за счет пропуска через них электрического тока.

Вольфрамовые штабики спекают по ступенчатому режиму: сначала при температуре 2000 – 2200 °С, окончательно – при 2900 – 3000 °С. Спекание молибдена ведут в вакууме при температуре 2300 °С, либо в водороде при температуре 1950 °С.

Спеченные штабики подвергают ротационной ковке с последующим волочением для получения проволоки. Перед ковкой вольфрамовые штабики нагревают до температуры 1450 °С в атмосфере водорода для предотвращения хрупкого разрушения. Волочение вольфрама начинают с диаметра 2,75 мм и ведут до 0,01 мм. На начальных стадиях деформации температура волочения составляет около 1000 °С, ее снижают до 400 – 600 °С на заключительных стадиях.

Нагрев ведут с помощью электрических нагревательных элементов, либо используют пламя газовой горелки. Проволоки с диаметром 0,3 мм и более изготавливают при помощи твердосплавных фильер, а при

меньших диаметрах проволоки используются алмазные фильеры.

В качестве смазки при волочении используют аквадаг – суспензию графита в воде. В процессе изготовления вольфрамовую проволоку подвергают нескольким промежуточным отжигам.

Первый проводят в газовой печи при температуре 800 °С и диаметре 0,5 мм для придания поверхности проволоки некоторой шероховатости, позволяющей лучше удерживать аквадаг. Следующие промежуточные отжики проводят в трубчатой электрической печи при температуре 600 – 750 °С с одновременным волочением через фильеру на диаметрах 0,3; 0,12; 0,05 мм.

При этом часть внутренних напряжений в проволоке снимается, и она становится более пластичной. Метод получения молибденовой проволоки аналогичен, описанному ранее. Отличие заключается лишь в том, что термообработку более пластичного молибдена (по сравнению с вольфрамом) ведут при температурах на 100 – 300 °С ниже.

Предел прочности промышленных не отожженных вольфрамовых проволок марок ВЧ, ВА, ВМ и ВТ зависит от диаметра и составляет, например, при диаметре 0,01 – 0,05 мм, 4500 – 3500 МПа.

Для молибденовой проволоки марки МЧ диаметром 0,05 – 0,1 прочность составляет 2500 – 2000 МПа [19].

При нагреве до температуры 1200 °С предел прочности проволок снижается и составляет, например, 740 МПа (для марки ВА) и 1390 МПа (для, например, марки ВР).

Бериллиевую проволоку изготавливают методом порошковой металлургии. Для этого из порошка бериллия путем прессования и последующего спекания получают бериллиевые заготовки. Перед волочением их, в случае необходимости, можно подвергать прокатке и ковке.

Собственно волочение бериллиевой проволоки проводят с подогревом или в металлической оболочке из пластичного металла, например, из никеля. Это связано со значительными силами трения, возникающими при протягивании бериллиевой заготовки через фильеру вследствие высокой жесткости Ве (модуль упругости  $E=32 \cdot 10^4$  МПа).

Нагрев ведут до температуры 400 – 480 °С, так как при этих температурах пластичность Ве высока и находится на уровне малоуглеродистых сталей. В качестве смазок используют суспензию мелкодисперсного графита на водяной или масляной основе, либо графитовый порошок с добавками дисилицида молибдена.

Величина обжатия за один проход составляет 12 – 35 %, а скорость волочения – 70 м/мин. После изготовления проволоку отжигают (температура 700 – 730 °С, в течение часа с охлаждением на воздухе) для снятия внутренних напряжений, либо для увеличения пластичности (785 – 815 °С, 30 минут).

Следует заметить, что стравливание металлической оболочки путем химической полировки с применением ультразвука приводит к сглаживанию поверхности проволоки и, как следствие, увеличению ее предела текучести на 50 – 140 МПа.

Предел прочности бериллиевой проволоки диаметром 1,8 мм составляет 1120 МПа, а при ее диаметре 0,051 мм – 1455 МПа.

**Вытяжка волокна из капли – метод Тэйлора.** Данный метод позволяет получать весьма тонкие (менее 50 мкм) непрерывные металлические волокна – нити. Для его реализации (рис. 2) металлический стержень (1), запаянный в стеклянной оболочке (2), при помощи механизма подачи (3) перемещают в зону индукционного нагрева (4) [20].

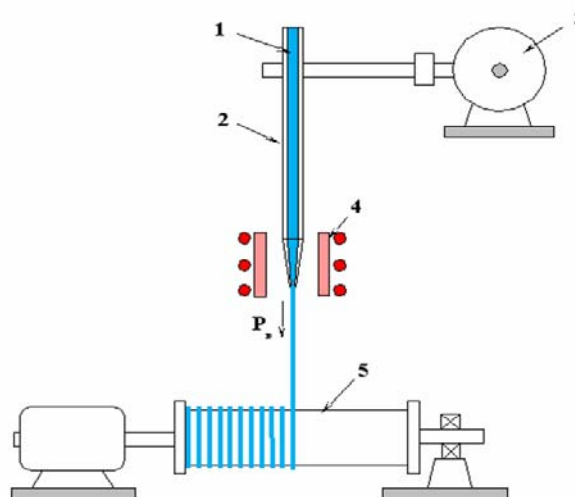


Рис. 2 – Схематическое изображение установки для получения металлических волокон по методу Тейлора: 1 – металлический стержень в стеклянной оболочке (2), 3 – механизм подачи, 4 – зона индукционного нагрева, 5 – намоточное устройство,  $\downarrow P_v$  – направление вытягивающего усилия.

Здесь происходит одновременное расплавление металла и размягчение стеклянной оболочки. При этом вследствие воздействия вытягивающего усилия ( $P_v$ ), приложенного к стеклянной оболочке, имеет место совместная вытяжка металла и стекла.

Размягченная стеклянная оболочка удлиняется, образуя капилляр, который заполняется металлическим расплавом в результате действия капиллярной силы. Объем расплавленного металла в зоне нагрева невелик, условно говорят о капле расплава (отсюда и название метода).

Таким образом, после охлаждения получают металлическую нить в стеклянной изоляции. Используя механизм подачи (3) и намоточное устройство (5) можно получать проволоки диаметром 1 – 30 мкм и длиной в несколько километров.

Метод Тэйлора эффективно используется для изготовления металлических нитей из Sn, Ag, Au, Cu, Ni, Co, Fe, а также из латуни и нержавеющей стали. Получаемые волокна имеют следующую прочность (МПа): Sn – 150, Ag – 650, Cu – 400, Fe – 2800.

## Выводы

1. Проведено схематическое описание обеих методов получения непрерывных волокон нитевидных кристаллов и их влияние на показатель прочности. Метод Тейлора по сравнению с методом волочения

позволяє отримувати більш високий показник міцності кристала, наприклад, Sn – 150, Ag – 650, Cu – 400, Fe – 2800 і др.

2. Критично проаналізовані технологічні операції, які складають методику проведення процесу волочення і роль кожної з них. К основним з них відносять термічну обробку, яку застосовують як для зняття наклепів, так і для надання дроту додаткової міцності, що достатньо суттєво для кінцевого показника міцності, нанесення змазочного покриття, травлення і безпосередньо сам процес «волочення».

3. Метод порошкової металургії дозволяє отримувати різні дроти нитевидних кристалів з високим кінцевим показником міцності.

#### Список літератури:

1. *Бережкова, Г. В.* Нитевидні кристали [Текст] / *Г. В. Бережкова*. – М.: Госиздат, 1969. – 158 с.
2. *Gordo, J. E.* Endeavour [Text] / *J. E. Gordo*, 1964. – No 23. – P. 8.
3. *Fraenkel, I. Z.* Phys. [Text] / *I. Fraenkel*, 1926. – No 37. – P. 572.
4. *Zwicky, F. Z.* Phys. [Text] / *F. Zwicky*, 1923. – No 24. – P. 131.
5. *De Boer, J. H.* Trans. Faraday Soc. [Text] / *J. H. De Boer*, 1936. – No 32. – P. 10.
6. *Mackenzie, J. K.* Thesis Univ. Bristol [Text] / *J. K. Mackenzie*, 1948. – No 11. – P. 21–24.
7. *Orowan, E.* Proc. Roy. Soc. [Text] / *E. Orowan*, 1940. – No 52. – P. 8.
8. *Keller, E.* Industr. And Engng. Chem. [Text] / *E. Keller*, 1964. – No 56. – P. 9.
9. *Hoffmann, G. A.* J. Metals [Text] / *G. A. Hoffmann*, 1958. – No 10. – P. 591.
10. *Hoffmann, G. A.* Astronautics [Text] / *G. A. Hoffmann*, 1958. – No 3. – P. 31.
11. *Hoffmann, G. A.* Neu Sci. [Text] / *G. A. Hoffmann*, 1961. – No 9. – P. 40.
12. *Levett, A. P.* Mater. Res. and Standarts [Text] / *A. P. Levett*, 1966. – No 6. – P. 64.
13. *McCreight, L. R.* Ceramic and Graphite Fibers and Whiskers [Text]: *L. R. McCreight, H. W. Rauch, W. H. Sutton*. – N.Y. – London, Acad. Press, 1965. – 244 p.
14. Нитевидні кристали [Текст] : матеріали всеросійської конференції «Дослідження і розробки по пріоритетному напрямку розвитку науки, технологій і техніки «Індустрія наносистем і матеріали», 18–19 січня 2007 року, г. Москва / редкол.: *Е. А. Гуділін*. – Москва. – ФГУ «Російський науковий центр «Курчатівський інститут».
15. *Шишелова, Т. І.* Нитевидні кристали [Текст] / *Т. І. Шишелова, Н. Е. Степанова, Д. А. Пльнська, М. А. Беляєва* // Успехи сучасного естествознания. – 2009. – No 8. – С. 12–13.
16. Нитевидні кристали [Текст]: матер. всерос. конф. / Дослідження і розробки по пріоритетному напрямку розвитку науки, технологій і техніки «Індустрія наносистем і матеріали». – Москва. ФГУ «Російський науковий центр «Курчатівський інститут», 2007.
17. *Дерягин, Б. В.* УНФ ДАН СССР [Текст] / *Б. В. Дерягин, Д. В. Федосеев, В. М. Лукьянович, Б. В. Синицин, В. А. Рябов, А. В. Лаврентьев*. – М.: Госиздат, 1968. – No 5. – С. 1094.
18. *Mc Aleer W. J., J.* Electrochem. Soc. [Text] / *W. J. Aleer, H. R. Barkemeyer, P. J. Pollak*, 1961. – No 108. – P. 1168.
19. *Wagner, R. S. J.* Metals [Text] / *R. S. Wagner, C. I. Doherty, W. C. Ellis*, 1964. – No 16. – P. 761.
20. *James, D. V. F.* Brit. J. Appl. Phys. [Text] / *D. V. F. James, C. Levis*, 1965. – No 16. – P. 1089.

#### Bibliography (transliterated):

1. *Berezhkova, G. V.* (1969). Nitevidnye kristally. Moscow: Gosizdat, 158.
2. *Gordo, J. E.* (1964). Endeavour, 23, 8.
3. *Fraenkel, I. Z.* (1926). Phys., 37, 572.
4. *Zwicky, F. Z.* (1923). Phys., 24, 131.
5. *De Voer, J. H.* (1936). Trans. Faraday Soc., 32, 10.
6. *Mackenzie, J. K.* (1948). Thesis Univ. Bristol, 11, 21–24.
7. *Orowan, E.* (1940). Proc. Roy. Soc., 52, 8.
8. *Keller, E.* (1964). Industr. And Engng. Chem., 56, 9.
9. *Hoffmann, G. A.* (1958). J. Metals, 10, 591.
10. *Hoffmann, G. A.* (1958). Astronautics, 3, 31.
11. *Hoffmann, G. A.* (1961). Neu Sci., 9, 40.
12. *Levett, A. R.* (1966). Mater. Res. and Standarts, 6, 64.
13. *McCreight, L. R., Rauch, H. W., Sutton, W. H.* (1965). Ceramic and Graphite Fibers and Whiskers. N.Y. London, Acad. Press, 244.
14. *Gudilin, E. A.* (2007). Nitevidnye kristally: materialy vserossijskoj konferencii «Dssledovaniya i razrabotki po prіoritetnomu napravleniyu razvitiya nauki, texnologij i texniki «Industriya nanosistem i materialy». Moskva Moskva. FGU «Rossijskij nauchnyj centr «Kurchatovskij institut».
15. *Shishelova, T. I., Stepanova, N. E., Plynskaya, D. A., Belyaeva M. A.* (2009). Nitevidnye kristally. Uspexi sovremennogo estestvoznaniya, 8, 12–13.
16. Nitevidnye kristally: mater. vsoros. konf. Issledovaniya i razrabotki po prіoritetnomu napravleniyu razvitiya nauki, texnologij i texniki «Industriya nanosistem i materialy». Moskva. FGU «Rossijskij nauchnyj centr «Kurchatovskij institut», 2007.
17. *Deryagin, B. V., Fedoseev, D. V., Lukyanovich, V. M., Sinicin, B. V., Ryabov, V. A. Lavrentev, A. V.* (1968). UNF DAN SSSR. Moscow: Gosizdat, 5, 1094.
18. *Mc Aleer W. J., Barkemeyer, H. R., Pollak, P. J.* (1961). J. Electrochem. Soc., 108, 1168.
19. *Wagner, R. S. J., Doherty, C. I., Ellis, W. C.* (1964). Metals, 16, 761.
20. *James, D. V. F., Levis, C.* (1965). Brit. J. Appl. Phys, 16, 1089.

Поступила (received) 17.03.2016

#### Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Аналіз методів отримання неперервних волокон нитевидних кристалів/ С. Р. Артем'єв, В. П. Шапоров**// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 17(1189). – С.14–18. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

**Аналіз методів отримання безперервних волокон ниткоподібних кристалів/ С. Р. Артем'єв, В. П. Шапоров**// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 17(1189). – С. 14–18. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

**Analysis of methods of receipt of continuous fibers of threadlike crystals/ S. Artemev, V. Shaporev**//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 17 (1189). – P.14–18. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Артем'єв Сергій Робленович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет цивільного захисту України, завідувач кафедри охорони праці та техногенно-екологічної безпеки, вул. Чернишевська, 94, м. Харків, Україна, 61023; тел.: 067-928-75-59; e-mail: [sergey.artemev.1967@mail.ru](mailto:sergey.artemev.1967@mail.ru).

**Артемов Сергей Робленович** – кандидат технических наук, доцент, Национальный университет гражданской защиты Украины; заведующий кафедрой охраны труда и техногенно-экологической безопасности, ул. Чернышевская, 94, г. Харьков, Украина, 61023; тел.: 067-928-75-59; e-mail: [sergey.artemev.1967@mail.ru](mailto:sergey.artemev.1967@mail.ru).

**Artem'ev Sergey Roblenovich** – Ph.D., Associate Professor, National University of Civil Defense of Ukraine; Head of the Department of Labour Protection and man-caused environmental security, st. Chernyshevskaya, 94, Kharkov, Ukraine, 61023; tel.: 067-928-75-59; e-mail: [sergey.artemev.1967@mail.ru](mailto:sergey.artemev.1967@mail.ru).

**Шаповрев Валерий Павлович** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; завідувач кафедри хімічної техніки та промислової екології, вул. Фрунзе, 21, м. Харків, Україна, 61002.

**Шаповрев Валерий Павлович** – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»; заведующий кафедрой химической техники и промышленной экологии, ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002.

**Shaporev Valery Paul** – PhD, Professor, National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute"; head of the department of chemical engineering and industrial ecology Str. Frunze, 21, Kharkov, Ukraine, 61002.

УДК 621.039.53

**А. И. КОМИР**

## РЕКОНСТРУКЦИЯ СТРУКТУРЫ ЯДЕРНОГО ГРАФИТА МЕТОДАМИ МНОГОТОЧЕЧНОЙ СТАТИСТИКИ

Представлен разработанный алгоритм реконструкции трехмерной структуры ядерного графита на основе металлографических изображений. В качестве модельного материала был использован ядерный графит марки АРВ. Проведен гистограммный и вариограммный анализ приведенной методики и отдельно алгоритма реконструкции двух- и трехмерных структур. Показано точность воспроизведения структуры – 4–5 % отклонения при реконструкции материала трехмерной структуры ядерного графита и 15 % отличие в коллинеарности структуры на расстояниях в половину размера реконструируемой структуры.

**Ключевые слова:** sGems, многоточечная статистика, 3D реконструкция, ядерный графит.

Наведено розроблений алгоритм реконструкції тривимірної структури ядерного графіту на основі металографічних зображень. У якості модельного матеріалу був використаний ядерний графіт марки АРВ. Наведено гістограмний і вариограммний аналіз наведеної методики і окремо алгоритму реконструкції двох-і тривимірних структур. Показано точність відтворення структури – 4–5 % відхилення при реконструкції матеріалу тривимірної структури ядерного графіту і 15 % відміну в колінеарності структури на відстанях в половину розміру реконструюється структури.

**Ключевые слова:** sGems, багатоточкова статистика, 3D реконструкция, ядерный графит.

Presents the developed algorithm of a three-dimensional reconstruction the structure of nuclear graphite based on metallographic images using methods of multipoint statistic. Currently used algorithm SNESIM as method for formation 2D structures. As model material was used nuclear graphite grade ARV with porosity about 20 %. The histogrammic and variogram analysis of the given technique and separately algorithm of reconstruction two – and three-dimensional structures is carried out. It is shown the accuracy of reproduction of structure – 4–5 % the variation in the reconstruction of three-dimensional material structure of nuclear graphite and a 15 % difference in the collinear structure at distances of half the size of the reconstructed structure. Presented algorithm can be based on different methods of reconstruction 2D structure using hard data points and training image and used for reconstruction structure of different materials.

**Keywords:** sGems, multi-point statistics, 3D reconstruction, nuclear graphite.

**Введение.** В 1963 Джорж Матерон ввел понятие кригинг (kriging) метод также известный как оптимальный или лучшей несмещенный прогноз (optimal or best linear unbiased prediction) [1], термины лучшее линейное предсказание были известны и ранее в работах Wold Н. в 1938 году [2] и А. Н. Колмогорова [3]. Однако именно Джоржу Матерону удалось формализовать и существенно углубить данную теорию.

Разработка методов оценки проницаемости структуры и количества определенной фазы в исследуемой структуре существенно поддерживалось различными нефте- и газодобывающими и сервисными компаниями, такими как Schlumberger, разработавшими платформу Ocean Software Development Framework [4], к которой в 2013 году был написан плагин TI Factory [5], являющийся одним из немногих реализаций реконструкции формирования трехмерной структуры на основе двумерной структуры методами многоточечной статистики.

Для решения задач определения газо- и гидропроницаемости среды, применялись методы форми-

рования структуры сети связанных пор M.J. Blunt et al. [6]. И метод решетчатых уравнений Больцмана [7], однако для данных методов требуется знание внутренней микроструктуры, в виде абстракции и вокселизованной структуры соответственно.

В последнее двадцать лет развитие статистических методов, направленных на формирование двух- и трехмерной структуры материалов на основе статистических данных, ускорило в связи с увеличением расчетных мощностей.

В последнее время исследования трехмерной структуры, а также моделирование на основе трехмерной структуры ядерного графита начинают набирать популярность. На основе трехмерной структуры образцов были проведены исследования газопроницаемости, в качестве источника данных о структуре использовался рентгеновский микротомограф [8], что дает существенный вклад в последующее развитие и дополнение моделированием газодинамики теории

© А. И. Комир. 2016