

УДК 663.952.1

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ УГЛЕРОДНЫХ НИТЕЙ

© Расим Султанович Ахметханов, Евгений Федорович Дубинин, Михаил Борисович
Модестов, Александр Анатольевич Шульженко

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения
им. А.А.Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия

aa_shulzhenko.01@mail.ru

Аннотация. В работе было проведено исследование тепловых свойств углеродной нити. Были получены тепловые поля, имеющие свои особенности, при различных структурах углеродной нити. Было выявлено, что большей неоднородностью обладают тепловые поля при наличии дефектов в виде узлов. Новизной работы является синтезирование структуры поперечного сечения углеродной нити с помощью методов фрактальной геометрии. Результаты работы могут быть использованы при разработке методик неразрушающего контроля и при проектировании тканых электронагревателей.

Ключевые слова: углеродные (графитовые) филаменты, углеродные (графитовые) нити, тканые электронагреватели, фракталы, мультифракталы, неразрушающий контроль.

SOME RESULTS OF STUDIES OF THERMAL FIELDS OF CARBON YARNS

© R.S. Akhmetkhanov, E.F. Dubinin, M.B. Modestov, A.A. Shul'zhenko

Mechanical Engineering Research Institute the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

aa_shulzhenko.01@mail.ru

Annotation. In the present work, a study of the thermal properties of a carbon yarn was carried out. Were obtained different thermal fields at different structures of the carbon yarn. It was found that thermal fields are highly heterogeneous in the presence of defects in the form of nodes. The novelty of the work is the synthesis of the structure of the cross-section of a carbon yarn using fractal geometry methods. The results of the work can be used in the development of non-destructive testing techniques and in the design of woven electric heaters.

Keywords: carbon (graphite) filaments, carbon (graphite) yarns, woven electric heaters, fractals, multifractals, non-destructive testing.

Все большее распространение получают тканые нагреватели, применяемые для решения самых различных технических задач. Нагреватели используются для обогрева самых различных устройств, работающих в холодных условиях, при фасовке целого ряда твердых и полутвердых продуктов в автоматических линиях, для компенсации тепловых потерь у ожоговых больных, для экстренного размораживания крови, хранящейся при очень низкой температуре и т.д. Как правило, в тканых нагревателях используют в качестве тепловыделяющих элементов углеродные нити. Поэтому, очень важно исследовать свойства этих нитей.

Углеродные нити, ее филаменты – элементарные ниточки состоят на 99% из углерода (форма - графит) [1]. В свою очередь, графит обладает ковалентной структурой, что оказывает существенное влияние на формирование тепловых полей, так как они образуются за счет фонон-фононных взаимодействий. Дополнительное воздействие теплового и электрического полей приводит не только к изменению энергетического состояния нити, а и к изменению формы суммарного теплового поля. Эти микроструктурные процессы уже описаны и широко известны [2-6].

Однако углеродные нити обладают и очень сложной макроструктурой, показанной на рис. 1. Рассмотрим, как это сказывается на формировании теплового поля нити.



Рис. 1. Углеродная нить

Расчеты теплового поля проводились с использованием эквивалентной цилиндрической модели углеродной нити по формуле, согласно [7,8]

$$T_{\text{нх}} = T_{\text{ср}} + \frac{U^2}{2\alpha\pi r_l^2 \rho_n} + \frac{U^2}{\lambda l_n^2 \rho_n} \left(\frac{x'}{2} - \frac{x'^2}{2} \right) \quad \text{или}$$

$$T_{\text{нх}} = T_{\text{ср}} + \frac{\rho_n \cdot l_n I^2}{\alpha \cdot S_{\text{бок}}} + \frac{\rho_n \cdot I^2}{\lambda} \left(\frac{x'}{2} - \frac{x'^2}{2} \right), \quad (1)$$

где $T_{\text{ср}}$ - температура окружающей среды; $x' = \frac{x}{l_n}$ - текущее относительное значение

координаты нити; x – текущее абсолютное значение координаты нити; l_n – длина нити; U – напряжение источника электропитания; ρ_n – погонное сопротивление углеродной нити; α – коэффициент теплоотдачи с поверхности углеродной нити во внешнюю среду; r_l – приведенный радиус углеродной нити; $S_{\text{бок}} = 2\pi r_l l_n$.

Однако результаты расчетов существенно отличались от экспериментальных данных - в 10÷12 раз.

В чем же причины отличий расчетных и экспериментальных тепловых характеристик углеродной нити, которая на первый взгляд представляет собой довольно плотное формирование?

Для выяснения был проведен эксперимент, при котором на одной из углеродных нитей тканого электронагревателя завязывался узел.



Рис. 2. Узел на углеродной нити

На рис. 3 показано тепловое поле такого нагревателя, у которого один из тепловыделяющих элементов – углеродная нить в месте разрыва завязана узлом. В области узла хорошо виден значительный подъем температуры.

Проведем анализ с использованием цилиндрической модели углеродной нити. Предположим, что площадь поперечного сечения нити S_1 постоянна по бездефектной длине нити l_1 , а область дефекта - узла имеет длину l_2 , где площадь поперечного сечения больше, чем в остальной части нити. Будем считать ее так же постоянной, но равной S_2 . Длину l_1 можно представить, как сумму длин, равных l_2 ,

$$l_1 = \sum_{i=1}^n l_{2i}, \text{ где } i = 1, \dots, n, \text{ число равно количеству размещений длин } l_2 \text{ в } l_1.$$

Длина нити без дефекта существенно больше длины узла, $l_1 \gg l_2$. Так как $S_2 > S_1$, то на участке узла сопротивление много меньше, чем на таких же расстояниях по длине остальной части нити. По всей длине нити сопротивление нити в без дефектных областях $R_1 = \rho \cdot l_1 / S_1$ будет много больше сопротивления в области узла $R_2 = \rho \cdot l_2 / S_2$, $R_1 \gg R_2$. Суммарное сопротивление углеродной нити по ее длине

$$R_n = R_1 + R_2 = \rho \cdot \left[\frac{\left(\sum_{i=1}^n l_{2i} \right)}{S_1} + \frac{l_2}{S_2} \right] \approx R_1.$$

Тогда электрический ток, протекающий по нити, будет определяться сопротивлением R_1 , и равен

$$I = \frac{U}{R_1}.$$

Мощность при прохождении по нити электрического тока может быть записана в следующем виде

$$P = I^2 \cdot R_n = I^2 \cdot (R_1 + R_2) = I^2 \cdot \rho \cdot \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{l_{2i}}{S_1} \right) + \frac{l_2}{S_2} \right], \quad (2)$$

где $S_1 = \pi r_1^2$; $S_2 = \pi r_2^2$; r_1 – приведенный радиус нити; r_2 – приведенный радиус узла; $r_1 < r_2$, n – число, кратное количеству размещений длин узла в бездефектной длине нити.

Если считать, что температура вдоль углеродной нити постоянна и не зависит от теплопроводности, то согласно (1)

$$T = T_{cp} + \frac{P}{\alpha \cdot S_{бок}},$$

и тогда рост температуры выше T_{cp} в бездефектной области под воздействием электрического поля

$$T_1 = \frac{P_1}{\alpha \cdot S_{бок1}} = \frac{I^2 \cdot \rho \cdot l_1}{\alpha \cdot \pi \cdot r_1^2 \cdot 2\pi \cdot r_1 \cdot l_1} = \frac{I^2 \cdot \rho}{\alpha \cdot 2\pi^2 r_1^3},$$

а в области узла

$$T_2 = \frac{P_2}{\alpha \cdot S_{бок2}} = \frac{I^2 \cdot \rho \cdot l_2}{\alpha \cdot \pi \cdot r_2^2 \cdot 2\pi \cdot r_2 \cdot l_2} = \frac{I^2 \cdot \rho}{\alpha \cdot 2\pi^2 r_2^3}.$$

Так как $r_2 > r_1$, то $T_2 < T_1$.

Согласно проведенным расчетам температура в области узла должна быть меньше температуры вдоль нити в бездефектной области, а по экспериментальным данным она больше. То есть возникает еще одно несоответствие.

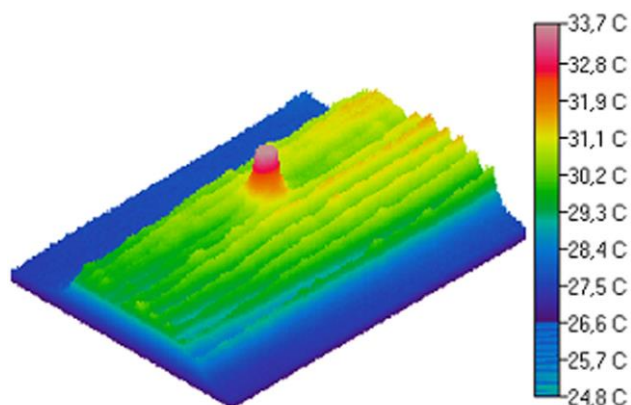


Рис. 3. Тепловое поле тканого электронагревателя. Один тепловыделяющий элемент – углеродная нить имеет узел

Рассмотрим другую модель углеродной нити, состоящую из множества филаментов, цилиндрической формы. Будем считать, что нить представляет собой множество подобных, аффинных элементов – сечений филаментов. Используем при синтезе сечения нити фрактальное представление, и проведем моделирование структуры поперечного сечения углеродной нити. Для этого предположим, что углеродная нить, пучки филаментов и филаменты имеют круглые сечения разного диаметра. Предположим, что нить состоит из 7 пучков филаментов. Поэтому, разобьем круг сечения нити на 7 пучков. Далее предположим, что каждый пучок состоит из семи филаментов. Тогда, согласно [9,10], будем иметь синтезированную конструкцию углеродной нити, показанную на рис. 4а. Для получения представления о более сложной структуре можно произвести еще большее разбиение сечения нити. В этом случае будем иметь модель, показанную на рис. 4б.

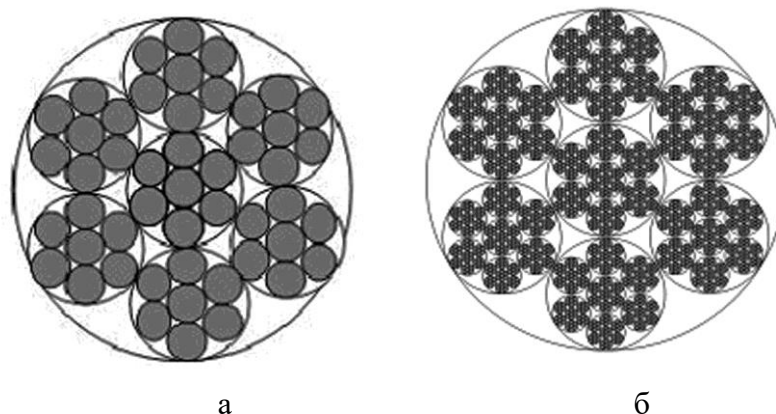


Рис. 4. Структура сечения углеродной нити, полученная путем моделирования многократного разбиения круга: а – 7 - кратного разбиения круга дважды; б – 7 - кратного разбиения круга четырежды

Будем считать, что круги последнего разбиения соответствуют сечениям филаментов. Как видим, на рис. 4а и 4б филаменты располагаются по сечению нити, как с плотным прилеганием друг к другу, так и через некоторые расстояния. При таком расположении филаментов реальная площадь боковой поверхности нити, складывающаяся из площадей боковых поверхностей филаментов, значительно больше, чем у цилиндрической модели углеродной нити [11].

Теперь, рассмотрим с этих позиций эффект большого отличия у обычной углеродной нити рассчитанных по цилиндрической модели температур от экспериментальных данных и эффект роста температуры в области узла при его наличии.

Раз площадь боковой поверхности нити намного больше, чем при расчете с использованием представлений нити в виде цилиндрической модели углеродной нити [11], то, согласно (1), в этом случае температура нити будет ниже температуры, рассчитанной с использованием цилиндрической модели. При завязывании узла происходит уплотнение нити в области узла и резкое снижение площади боковой поверхности. Причем, уменьшение электрического сопротивления узла гораздо меньше, чем уменьшение площади боковой поверхности нити в этой области, что в конечном результате, приводит к росту температуры (1).

Применение такой модели объясняет расхождение расчетных и экспериментальных данных о тепловом поле углеродной нити и явление повышения температуры в области узла.

Экспериментальные данные и их обработка с использованием методов теории фракталов подтверждают эти предположения.

Конечно, структура углеродной нити гораздо сложнее простой цилиндрической модели. Синтезированное с помощью монофрактального представления ее сечение далеко не полностью соответствует истинному сечению. Распределение сечений филаментов по сечению нити и ее пучкам в действительности носит случайный характер, и сечения филаментов представляют собой множество самых разнообразных форм и т.д. Поэтому, более полное представление о структуре углеродной нити дает анализ теплового поля нити, имеющего мультифрактальный характер с помощью мультифрактального спектра.

Мультифрактальный спектр (спектр сингулярностей - неоднородностей) $f(\alpha)$ характеризует зависимость от ε числа элементов покрытия N_α , соответствующих точкам с экспонентной сингулярностью, равной некоторому значению α [12-13]

$$N_\alpha(\varepsilon) \sim \varepsilon^{-f(\alpha)}.$$

Величина $f(\alpha)$ при условии $\alpha = const$ соответствует размерности Хаусдорфа. В этом случае, при равномерном распределении меры на множестве спектр сингулярностей представляет

собой единственную точку на плоскости (α, f) , а при неравномерном распределении меры, что характерно для более сложных структур, функция $f(\alpha)$ имеет более сложный (колоколообразный) вид.

На рис. 5 приведен мультифрактальный спектр изображения теплового поля при отсутствии дефекта в виде узла на углеродной нити. Максимальное значение фрактальной размерности при напряжении 6В - $d=1,4994$. Такое значение свойственно достаточно «рыхлым» структурам.

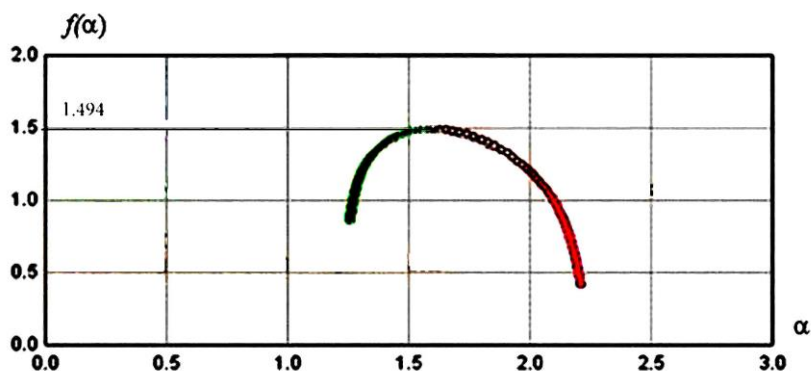


Рис.5. Мультифрактальный спектр теплового поля (напряжение 6 В)

Исследование теплового поля углеродной нити с дефектом нити в виде узла (рис. 2), показывает, что его фрактальный спектр также является мультифрактальным (рис. 6).

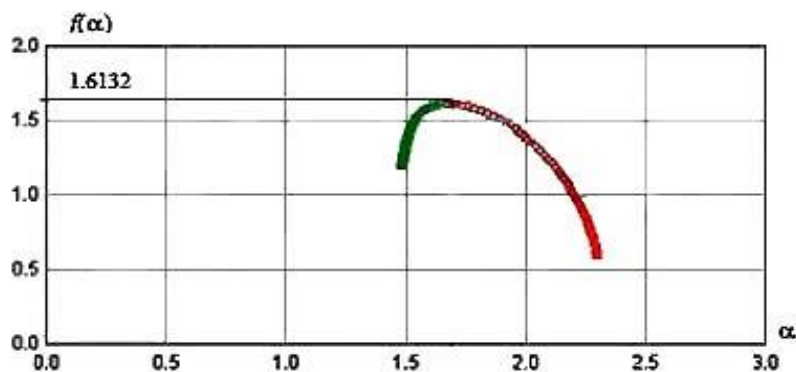


Рис. 6. Мультифрактальный спектр теплового поля углеродной нити при наличии дефекта в виде узла

В этом случае значение фрактальной размерности у углеродной нити составляет $d=1,6132$. Как видим, при наличии узла фрактальная размерность увеличилась, что характерно при увеличении плотности структуры. Кривая мультифрактального спектра сдвинулась в сторону больших значений α . Изменилась величина α , при которой функция $f(\alpha)$ имеет максимум. Также стала меньше величина ширины спектра, и появилась значительная асимметрия. Такая характеристика свойственна тепловому полю, создаваемому тепловыделяющими элементами с большими неравномерностями структуры.

Выводы. Моделирование макроструктуры углеродной нити в поперечном сечении показывает, что она обладает неоднородностью. Степень прилегания филаментов друг к

другу различная, больше того между филаментами имеются промежутки, которые существенно увеличивают площадь боковой поверхности углеродной нити, а, следовательно, при ее использовании в качестве тепловыделяющего элемента необходимо учитывать, что по сравнению с ее цилиндрической моделью температура на поверхности реальной нити будет меньше за счет большей теплоотдачи.

В области нахождения узла температура будет подниматься, за счет существенного изменения структуры углеродной нити.

Данные результаты подтверждаются исследованиями тепловых характеристик с помощью фрактальных методов. Реальное тепловое поле носит мультифрактальный характер, свойственный сложным структурам. Наличие узла в углеродной нити приводит к еще большему усложнению структуры, к возрастанию неоднородности теплового поля и уменьшению упорядоченности.

Результаты исследования могут использоваться при разработке методик неразрушающего контроля и при проектировании тканых электронагревателей.

Список литературы

1. Ахметханов Р.С., Шульженко А.А. Электропроводность и фрактальные свойства углеродных нитей// Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2019. - № 6. - С. 99-105.
2. Винтайкин Б.Е. Физика твердого тела. Учебное пособие. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2008. - 360 с.
3. Гуревич А.Г. Физика твердого тела. Учебное пособие для вузов. – СПб.: Невский Диалект, БХВ-Петербург, 2004. – 320 с.
4. Дмитриев А.С. Введение в нанотеплофизику. – М.: ВИНОМ, Лаборатория знаний, 2015. - 790 с.
5. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Учебное пособие: Для вузов. Электричество. Т.3. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. - 656 с.
6. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников. – М.: Мир, 1978. – 616 с.
7. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. «Теплопередача». - М.: Энергия, 1975. - 487 с.
8. Ахметханов Р.С., Шульженко А.А. Фрактальный анализ тепловых свойств тканых нагревателей на основе углеродных нитей// Проблемы машиностроения и автоматизации. - 2020. - № 2. - С. 56-61.
9. Чумак О.В. Энтропии и фракталы в анализе данных. - М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2011. - 82 с.
10. Ибрагимов Э. Круговой фрактал (дата обращения 06.12.2020 grafika.me/node/523).
11. Шульженко А.А., Андрианов Н.А., Модестов М.Б. Особенности работы тепловыделяющего элемента на основе углеродной нити// Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2014. - № 2. - С. 97-103.
12. Павлов А.Н., Анищенко В.С. Мультифрактальный анализ сложных сигналов// Успехи физических наук. - 2007. - №8 (177). - С. 859-876.
13. Ахметханов Р.С. Применение вейвлет-анализа и теории фракталов в исследовании изображений микрошлифов//Заводская лаборатория. Диагностика материалов. - 2015. - № 3(81). - С. 31-37.

Дата поступления: 23 июня 2021 г.