
**НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ,
ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ**

УДК 663.952.1

**ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ И ФРАКТАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА
УГЛЕРОДНЫХ НИТЕЙ**© 2019 г. Р. С. Ахметханов^{1,*}, А. А. Шульженко¹¹*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва, Россия***e-mail: mibsts@mail.ru*

Поступила в редакцию 07.05.2018 г.

Принята к публикации 08.08.2019 г.

В статье анализируются причины, влияющие на электрические параметры тепловыделяющих элементов на основе углеродных нитей, используемых в тканых нагревателях. Одной из причин является наличие электрических контактов между филаментами, сформированных случайным образом. Новым является подход к рассмотрению структуры, влияющей на электрическое сопротивление углеродной нити, с точки зрения фрактального представления. Результаты можно использовать при конструировании и усовершенствовании технологии изготовления с целью улучшения электрических параметров тканых нагревателей.

Ключевые слова: тепловыделение, углеродные нити, электропроводность, контактные соединения филаментов, фрактальные свойства, тканые электронагреватели

DOI: 10.1134/S0235711919060026

Введение. Все более широкое применение в машиностроительной промышленности и других отраслях народного хозяйства находят эластичные тканые электронагреватели, являющиеся элементами энергосберегающих нанотехнологий. В этих нагревателях используются тепловыделяющие элементы из самых разнообразных материалов: одножильных и многожильных металлических проволок, нитей различной плотности и структур и др. Особое место в этом спектре тепловыделяющих элементов играют углеродные (графитовые) нити. Их отличает высокая эластичность, электропроводность, способность выдерживать большую нагрузку на разрыв, способность долго работать при значительных токовых нагрузках и т.д.

Применение углеродных волокнистых материалов в качестве нагревательных элементов позволяет: 1) за счет высокой эластичности обеспечить контактный обогрев изделий со сложным профилем поверхности, что существенно снижает теплотери; 2) широко варьировать электрические характеристики нагревателей за счет возможности выбора из широкой номенклатуры выпускаемых нитей, нитей с требуемыми электрическими и другими физическими свойствами; 3) получать нагревательные элементы с различной площадью и с требуемой формой и уровнем распределения температуры по поверхности; 4) повысить надежность работы нагревателей за счет использования параллельных соединений; 5) гарантировать долговечность работы нагревательных элементов в течение 30 лет и более; 6) обеспечить экологическую чистоту изделий; 7) обеспечить возможность привычной циркуляции воздуха при использовании тканых электронагревателей в одежде; 8) обеспечить самые различные температурные режимы от “мягкого” тепла до температур в сотни градусов.

Модели и тепловой расчет тепловыделяющих элементов тканых нагревателей. При тепловых расчетах тканых электронагревателей применяют модель углеродной нити в виде проволоки – тонкого цилиндра. Такая тепловая модель хорошо описана [1, 2].

При использовании цилиндрической модели предполагаем: диаметр филамента углеродной нити намного меньше его длины; площадь сечения намного меньше площади боковой поверхности; нить скручена настолько плотно, что внутренняя часть нити представляет собой однородное пространство, т.е. моделью нити может служить цилиндр.

Померить диаметр углеродной нити не представляется возможным из-за ее высокой эластичности, поэтому для определения диаметра используется косвенный метод, с помощью которого производится расчет эквивалентного диаметра углеродной нити через ее электрическое сопротивление, удельную электропроводность, удельный вес и удельную плотность. То есть при формировании цилиндрической модели делаются довольно большие допущения, вносящие существенные искажения в объективное представление о тепловыделяющем элементе на основе углеродной нити.

Экспериментальные исследования подтверждают несоответствие используемой цилиндрической модели реальной картине [1]. Поэтому целесообразно определить, какие свойства углеродных нитей необходимо учесть, чтобы на этой базе сформировать новую модель, более точно подходящую для описания тепловых процессов, происходящих в тепловыделяющих элементах на основе углеродных нитей.

Так как электрическое сопротивление тепловыделяющего элемента является одним из основополагающих факторов при расчете мощности нагревателя, рассмотрим, что оно собой представляет.

Обычно мощность тепловыделяющих элементов определяется [1]

$$P = \frac{U^2}{R_{\text{нагр}}}, \quad (1)$$

где U – электрическое напряжение; $R_{\text{нагр}}$ – суммарное электрическое сопротивление тепловыделяющего элемента.

В формуле (1) предполагается, что мы имеем дело с суммарным электрическим сопротивлением всех компонентов, составляющих углеродную нить.

Рассмотрим, из чего складывается электрическое сопротивление в углеродной нити. Согласно техническим данным на углеродную нить УВИС-НШ-215 [3] количество филаментов – элементарных волокон, в сечении нити составляет ~2000.

Структура нити. Углеродные нити обладают протяженной структурой, которая может быть организована в виде непрерывной формы или как дискретная (рубленая) форма. Группы непрерывных углеродных волокон образуют пучки, имеющие двумерное или трехмерное ламинарное переплетение. На рис. 1а показан вид вдоль нити, а на рис. 1б показано поперечное сечение углеродной нити [4]. Таким образом, углеродная нить представляет собой переплетенные пучки, состоящие из большого числа элементарных углеродных волокон – филаментов.

Как правило, филаменты – элементарные нити имеют длину меньше длины углеродной нити, и она носит случайный характер. Распределение филаментов по длине нити также представляет собой случайный характер. Случайным образом филаменты располагаются и по сечению углеродной нити (рис. 1б). Следовательно, можно сделать заключение, что углеродные нити состоят из множеств филаментов, случайным образом распределенных в нити.

Будем считать, что отдельные филаменты имеют форму, близкую к цилиндрической. Между отдельными филаментами имеются электрические контакты, которые во многом определяют формирование общего сопротивления углеродной нити. Как правило, контакт происходит по цилиндрической, боковой поверхности филаментов. Контактное электрическое сопротивление зависит от того, насколько отдельные фи-

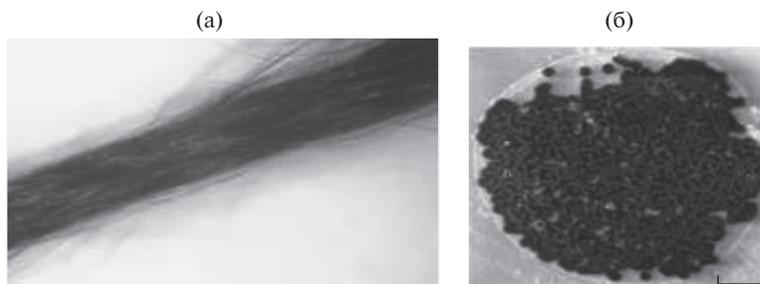


Рис. 1. Углеродная нить: (а) – вид вдоль нити; (б) – поперечное сечение.

ламенты прижаты друг к другу. Контактное электрическое сопротивление очень чувствительно к любым изменениям электрических свойств филаментов. Также значительные изменения в электрической проводимости происходят на фоне имеющей место деформации. И общее контактное сопротивление в этом случае представляет собой функцию, зависящую от числа контактов.

Модели электрических контактов. Поверхность одного проводника, соприкасающаяся с поверхностью другого проводника, называется *контактной поверхностью*. У электрического контакта следует различать кажущуюся и действительную поверхности соприкосновения. Контактная поверхность филаментов обладает микроскопическими бугорками и шероховатостью, и сами филаменты углеродной нити дополнительно имеют еще изгибы. Поэтому, в действительности две поверхности будут соприкасаться не по всей площади, а лишь отдельными площадками. При расчетах условно различают три типа контактов: точечный, линейный и поверхностный.

У точечного контакта соприкосновение происходит только в одной точке, кажущаяся и действительная поверхности соприкосновения совпадают. У линейных контактов соприкосновение происходит по точкам, лежащим на одной линии. Минимальное количество точек соприкосновения при линейном контакте равно двум. У поверхностного контакта соприкосновение происходит по точкам, расположенным на соприкасающихся поверхностях. Минимальное количество точек соприкосновения при поверхностном контакте равно трем.

В месте возникновения контакта между филаментами возникает электрическое сопротивление, которое называется переходным сопротивлением контакта. Сопротивление проводника в области контактного соединения описывается формулой [5]

$$R_k = C\rho \frac{B}{q}, \quad (2)$$

где ρ – удельное сопротивление материала контакта, Ом м; B – длина контакта, м; q – площадь сечения контакта, м²; C – опытный коэффициент.

Очень важно правильно выбрать контактное давление между контактирующими элементами. Для установления оптимального соотношения между переходным сопротивлением и контактным давлением с одной стороны, давление в контакте должно быть достаточным для того, чтобы обеспечить малое переходное сопротивление, с другой – оно не должно вызывать в материале контактов пластических деформаций, способных привести к их разрушению.

В переходном сопротивлении контакта происходит повышение плотности тока по сравнению с плотностью тока в самом контакте. В местах соприкосновения филаментов линии тока стягиваются к участкам с малым сечением, которые представляют

большое сопротивление току. Это сопротивление называется сопротивлением стягивания и определяется по формуле [6]

$$R_k = \rho / (2an), \quad (3)$$

где ρ – удельное сопротивление материала контактов, Ом м; a – радиус площадки фактического касания, м; n – число точек касания.

На основании опытных данных величина переходного контактного сопротивления, которая зависит от контактного усилия, определяется выражением [6]

$$R = \frac{k}{(F)^\beta}, \quad (4)$$

где F – контактное усилие, k – коэффициент, зависящий от материала и формы контакта, способа обработки и состояния контактной поверхности; β – показатель степени, характеризующий число точек соприкосновения: при точечном контакте $\beta = 0.5$; при линейном контакте $\beta = 0.5, \dots, 0.7$; при поверхностном контакте $\beta = 0.7, \dots, 1.0$.

Рассмотрим контакт двух филаментов, которые представим в виде цилиндров. Такое возможно по двум причинам: 1) нить представляет собой группы скрученных жгутов из филаментов. При значительном числе кручений нити на погонный метр можно считать, что близко расположенные области отдельных филаментов обладают некоторой жесткостью, и обеспечивают поддержание одинакового давления; 2) поддерживающая конструкция самой ткани, т.к. тепловыделяющий элемент обычно работает в структуре ткани. Выбранный способ плетения ткани также обеспечивает примерно одинаковые давления между филаментами.

Так как при изготовлении тканого материала используются крученые углеродные нити, и они натягиваются, то усилие контактного взаимодействия между филаментами нити определяется функционалом $F = f(\alpha, N)$, где α – угол скручивания, N – сила натяжения.

При действии нагрузки F на эти филаменты образуется контактная площадка шириной $2b$ и длиной L . Общая расчетная схема представлена на рис. 2. Максимальное давление в опоре вдоль оси прямоугольной площади контакта без учета изгибной деформации филаментов определяется следующим выражением [7]

$$P_{\max} = \frac{2F}{\pi b l}.$$

Полуширина контактной площадки

$$b = \sqrt{\frac{4F(1 - \nu^2)R}{\pi LE}}, \quad (5)$$

где F – величина силы, действующей на филаменты, L – длина контактной площадки; E – модуль упругости; ν – коэффициент Пуассона; R – радиус филамента.

Представим полуширину контактной площадки в виде

$$b = CF^{0.5}, \quad (6)$$

где C – коэффициент, зависящий от параметров: L , E , R и ν .

Таким образом, контактное сопротивление между двумя филаментами определяется величиной контактной площадки, которая напрямую зависит от приложенной нагрузки F .

В работе [4] были проведены экспериментальные исследования зависимости электрического сопротивления углеродной нити при различных контактных нагрузках. На рис. 3 показан характер изменения сопротивления при увеличении нагрузки в логарифмических координатах. Эта зависимость имеет вид прямой с коэффициентом наклона равным 0.86. Таким образом, распределение контактных точек по всему объ-

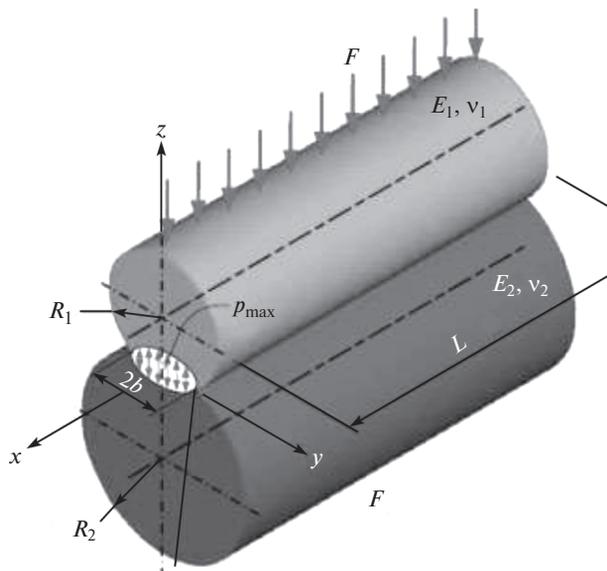


Рис. 2. Расчетная схема.

ему носит фрактальный характер. Закономерность распределения контактных точек по диаметру является близким к нормальному распределению, а вдоль углеродной нити отличается от нормального.

Согласно классическому определению, введенному Б. Мандельбротом, под фракталом понимается структура, состоящая из частей, которые в каком-то смысле подобны целому [8, 9]. Таким образом, можно утверждать, что электрическая структура углеродной нити, состоящая из подобных ей элементарных ниточек – филаментов и контактных точек между ними, представляет собой фракталы.

Можно определить фрактальную размерность поперечного сечения нити (рис. 1б). В этом случае получим следующую величину фрактального сечения $d = 1.86$.

При рассмотрении выражения для полуширины контактной площадки была получена зависимость с показателем 0.5. А эксперимент дает показатель 0.86. Отличие возникает за счет того, что филаменты не являются идеальными цилиндрами и при скручивании нити они контактируют под некоторым углом. Также их поверхность не идеально гладкая, наличие шероховатости и изгибов влияет на зависимость изменения электрического сопротивления нити от уровня нагружения.

Небольшой разброс фрактальной размерности объясняется малой девиацией электрических характеристик самой нити и технологических настроек ткацкого оборудования.

Также разброс параметров складывается из различных факторов: собственных сопротивлений филаментов, т.к. они обладают различными длинами и диаметрами, количеством контактных площадок между филаментами, их размеров, разными уровнями создаваемых давлений на филаменты в нити: за счет кручения нити и за счет способа плетения ткани и т.д.

Феноменологическая модель. Особое место при формировании электрического сопротивления тепловыделяющего элемента занимают обрывы углеродной нити, возникающие в ходе технологической обработки при создании электропроводящей ткани. Специальное исследование этой составляющей электрического сопротивления в дан-

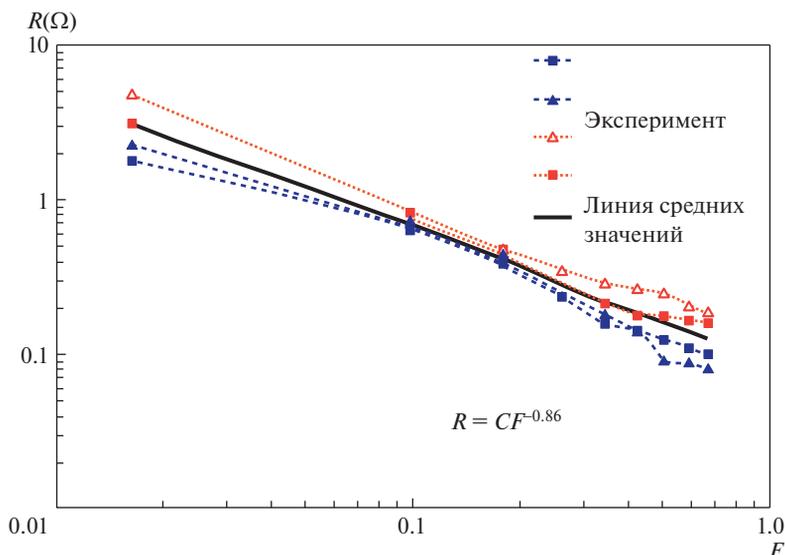


Рис. 3. Характеристика сопротивления углеродного волокна при контактной нагрузке F (относительная нагрузка на единицу длины нити), $F = 1.00$ соответствует величине 70Н.

ной работе не проводилось. Будем считать, что размеры узла стремятся к нулю. Усилия прижатия филаментов, участвующих в формировании узла больше контактных усилий, действующих при формировании контактов между филаментами, а сечения по длине узла больше сечения нити. Поэтому величина электрического сопротивления в области узла будет намного меньше величины суммарного сопротивления филаментов и контактов между филаментами.

С учетом выражений (1)–(6) и того, что тепловое поле тканого нагревателя на основе углеродной нити является фрактальным [10], электрическое сопротивление углеродной нити единичной длины и площадью поперечного сечения S можно представить феноменологической моделью

$$R(\Omega) = \rho((S(d-1))^{-1} + (2nCF^{0.5K})^{-1} + h_y),$$

где n – приведенное среднее число контактов в сечении нити единичной длины, S – площадь поперечного сечения, d – фрактальная размерность сечения нити, K – поправочный коэффициент ($1 < K < 2$), h_y – поправочный коэффициент, который учитывает наличие дефекта.

Первый член в скобках описывает площадь поперечного сечения углеродной нити с учетом степени заполнения филаментами данной площади, второй – определяет зависимость от контактного усилия между филаментами и третий – влияние дефектов.

Выводы. Углеродная нить представляет собой протяженную структуру, состоящую из множества филаментов, которые распределены случайным образом по длине и сечению нити. Больше того, рассматриваемые элементы множеств являются самоподобными, а структура углеродной нити является фрактальной. И электрическое сопротивление углеродной нити, сформированное на основе множества контактов между филаментами, также обладает фрактальными свойствами.

Полученные результаты могут использовать специалисты, которые работают в области проектирования тканых электронагревателей и разработки технологических

процессов для изготовления электронагревательных тканей. А также для получения оптимального теплового эффекта от тканого нагревателя.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шульженко А.А., Андрианов Н.А., Модестов М.Б., Мнев Б.А. Особенности расчета тканого нагревателя с углеродными электропроводными нитями // Ж. Проблемы машиностроения и надежности машин. 2010. № 6. С. 93.
2. Шульженко А.А., Модестов М.Б., Мнев Б.А. Расчет теплового поля тканого нагревателя со сплошным расположением высокоомных нитей // Ж. Проблемы машиностроения и надежности машин. 2009. № 5. С. 112.
3. Технические характеристики продукции. Проспект. М.О.: УВИКОМ, 1997.
4. Yuliang Deng. Carbon fiber electronic interconnects. Dis. ... Ph.D. College Park: the Faculty of the Graduate School of the University of Maryland, 2007. P. 74.
5. Ефименко А., Мерлян С.В. Переходное контактное сопротивление в электрических соединениях с плоскими контактами // Ж. Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2013. № 4. С. 3.
6. http://lms.tpu.ru/pluginfile.php/52709/mod_resource/content/0/content/1.pdf (Дата обращения 23.03.2018).
7. Zeping Wei. Stresses and deformations in involute spur gears by finite element method. Thesis for the Degree of master of Science, 2004. P. 96.
8. Ахметханов Р.С. Применение теории фракталов в исследовании динамических свойств механических систем // Ж. Проблемы машиностроения и автоматизации. 2003. № 3. С. 47.
9. Ахметханов Р.С. Применение вейвлет-анализа и теории фракталов в исследовании изображений микрошлифов // Ж. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. № 3. С. 31.
10. Ахметханов Р.С., Дубинин Е.Ф., Шульженко А.А., Модестов М.Б. Диагностика тканых электронагревателей на основе углеродных нитей // Сборник: Живучесть и конструкционное материаловедение, труды конференции. 2016. С. 200.