

УДК 663.952.1

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ ГРАФИТОВОГО СТЕРЖНЯ

© Расим Султанович Ахметханов, Евгений Федорович Дубинин,
Александр Анатольевич Шульженко
Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия
mibsts@mail.ru, aa_shulzhenko.01@mail.ru

Аннотация. В статье представлены результаты исследования тепловых свойств графитового стержня (грифеля). Были получены тепловые поля, отличающиеся своими характеристиками, при различных уровнях приложенного напряжения постоянного тока. Структура теплового поля менялась с изменением приложенного напряжения, изменялись и статистические характеристики теплового поля, что свидетельствует о неоднородности электрических свойств углеродного стержня, а также о влиянии технологического процесса их изготовления.

Ключевые слова: углеродный (графитовый) стержень, тепловое поле, кластеризация, связность Минковского, статистические характеристики, фрактальный размер.

SOME RESULTS OF STUDIES OF THERMAL FIELDS OF A GRAPHITE ROD

© R.S.Akhmetkhanov, E.F.Dubinin, A.A.Shul'zhenko
Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of RAS, Moscow, Russia
mibsts@mail.ru, aa_shulzhenko.01@mail.ru

Abstract. The paper presents the results of the study of the thermal properties of a graphite rod (lead). Thermal fields with their own characteristics were obtained at different levels of the applied DC voltage. The structure of the thermal field changed with the change of the applied voltage, the statistical characteristics of the thermal field also changed, which showed the heterogeneity of the electrical properties of the carbon rod and also the influence of the technological process of their production.

Keywords: carbon (graphite) rod, thermal field, clustering, Minkowski connectivity, statistical characteristics, fractal size.

При расчете теплового поля, создаваемого объектом, обычно применяют идеализацию геометрии, свойств материала, например, используют цилиндрическую модель для объектов, имеющих конфигурацию близкую к цилиндрической проволоке. Однако при проведении испытаний реальное тепловое поле часто значительно отличается от расчетного.

Существенно то, что тепловое поле любого материала отражает структуру этого материала [1].

На рис.1 приведено расчетное тепловое поле указанной модели тепловыделяющего элемента в виде стержня [2].

В реальности тепловое поле выглядит иначе. На рис. 2а приведено тепловое поле графитового стержня, а на рис. 2б – углеродной нити.

Тепловое поле графитового стержня более гладкое с характерными волнами температурных изменений по длине стержня. Эти два рисунка показывают зависимость характеристик теплового поля от структуры материала, которая не учитывается при идеализации объекта исследования и теплофизических свойств материала объекта исследования.

При различном уровне подведенного постоянного напряжения статистические характеристики теплового поля изменяются.

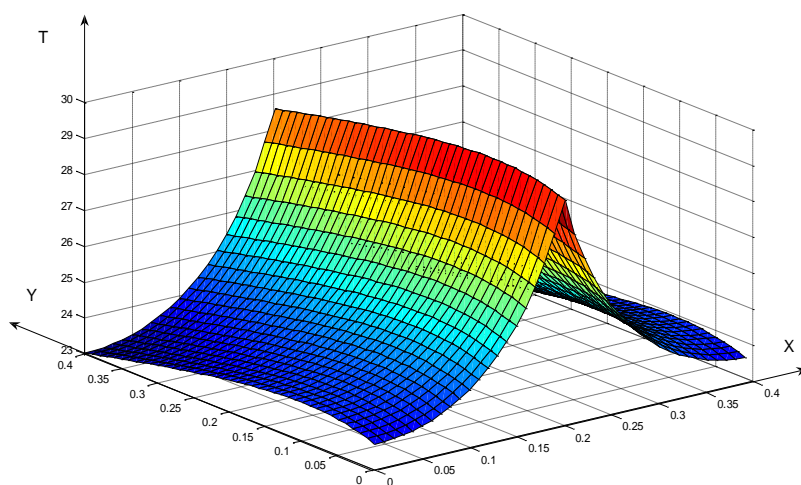


Рис. 1. Суммарное расчетное тепловое поле идеализированного тепловыделяющего элемента в виде стержня (проволоки)

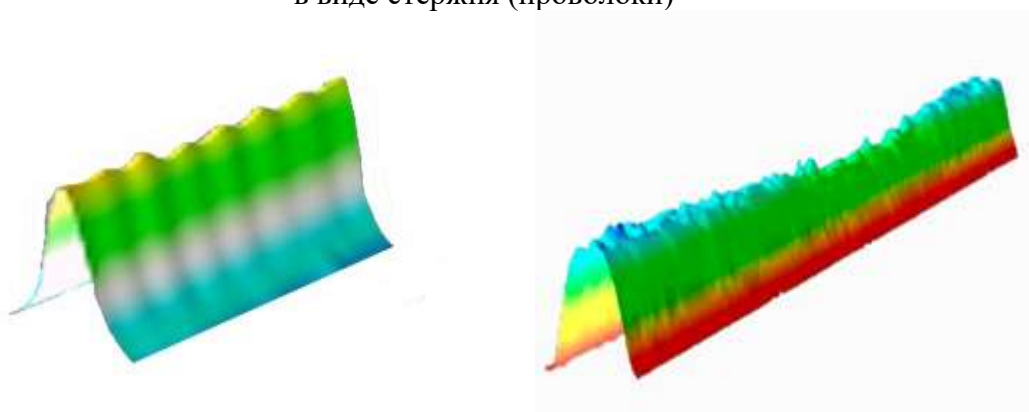


Рис. 2. Трехмерное изображение теплового поля графитового стержня (а) и углеродной нити (б)

Например, в ранее рассмотренной углеродной нити, которая обычно состоит из нескольких тысяч филаментов, располагающихся по сечению нити. Макроструктура углеродной нити неоднородна, и как было показано [1], она представляет собой фрактальную структуру. Основным принцип распределения филаментов по сечению носит случайный характер. Случайный характер в структуре имеет и распределение филаментов вдоль нити, так как длины филаментов разные, чаще всего короче длины нити, используемой в качестве тепловыделяющего элемента в нагревателе. При воздействии на нить различных напряжений источника постоянного электрического тока происходит изменение сил взаимодействия между филаментами. В результате происходит изменение расположения филаментов как по сечению нити, так и по длине. Изменения в макроструктуре, взаимное расположение филаментов, влияют как на электрические, так и на тепловые характеристики углеродной нити, например, на максимальную температуру [1,3].

Предметом исследований в данной работе является изучение поведения структуры графитового стержня (грифеля), имеющего круглое сечение. Методика исследования предполагает проведение анализа тепловых полей, создаваемых графитовым стержнем под воздействием различного уровня напряжения от источника постоянного электрического тока.

При рассмотрении результатов экспериментов следует учесть, что графит является полупроводниковым материалом. Согласно [4], тепло передается благодаря фонон-фононному взаимодействию, носящему равновесный характер при некоторой внешней температуре. При воздействии внешнего источника энергии происходит процесс возбуждения неравновесных фононов. Это воздействие приводит не только к изменению температуры, но и смещению максимума частотного спектра всех фононов в сторону более высоких частот. При подаче на графитовый стержень возрастающего напряжения от внешнего источника происходит не только генерация дополнительных фононов, но и изменение их распределения по частоте, смещение максимума количества участвующих в процессе фононов в сторону больших частот. Это явление влияет на формирование теплового поля грифеля, и, следовательно, на структурные изменения, происходящие при изменении напряжения, которые выводятся из состояния теплового поля грифеля.

Рассмотрим более подробно структуру графитового стержня, грифеля. Грифель является композиционным материалом, где наполнителем является графит, а матрица состоит из глины. Как известно, электропроводность чувствительна к изменениям в структуре композиционного материала. При рассмотрении тепловыделяющих элементов на основе графита наряду с электрическими свойствами следует учитывать теплофизические характеристики компонентов материала, существенно влияющие на создаваемые тепловые поля.

Графит, который является наполнителем в грифеле, встречается в природе в виде минерала, но его можно и синтезировать. Он довольно мягкий и имеет серовато-черную окраску с маслянистым блеском, хорошо проводит электрический ток. Кроме того, графит обладает превосходными смазочными свойствами и поэтому используется как смазочное средство в движущихся частях машин. Обожженная смесь графита с глиной используется для изготовления карандашных грифелей. Хорошая электропроводность графита позволяет применять его для изготовления электродов.

Оксиды алюминия и оксиды кремния составляют значительную часть химического состава глины жёлтого, коричневого, синего, зелёного, фиолетового и даже чёрного цветов. Глины имеются повсюду, что и неудивительно – глина, осадочная порода, – это камень, перетертый временем и внешними воздействиями до состояния порошка, последняя стадия эволюции камня (камень – песок – глина).

Электропроводимость грифеля зависит от количества порошка графита, однородности смеси, подготовленной для формовки, и особенностей технологии формообразования.

Грифель карандаша производится из смеси порошков графита и специальной глины. Сам же графитовый порошок изготавливается из глинистого сланца. Он представляет собой уплотненную глину с метаморфическими изменениями. Графитовый порошок состоит из мелких глинистых минералов, не размокает в воде, цвет его может быть черным, темно-серым, иногда красноватым или зеленоватым. Если рассматривать его под микроскопом, то можно увидеть там и кристаллы серного колчедана, и прожилки кварца, и зерна известкового шпата. Кроме того, в структуре материала есть вкрапления в виде зерен кварца, листочков слюды, иголочек рутила и др. В зависимости от минералогического состава и его физических свойств различают следующие виды глинистого сланца: кровельный, аспидный, грифельный, точильный, рисовальный и квасцовый сланец. В нашем случае используется грифельный сланец.

Смесь графита и грифельного сланца тщательно перемешивается с водой, потом высушивается, затем снова перетирается в порошок, а в конце вновь добавляется небольшое количество воды до образования густой пасты. От соотношения графита и глины (сланца) в этой пасте будет зависеть твердость карандаша. Что, в свою очередь, зависит не только от общего соотношения графита и глины (сланца) в пасте образца, а и от технологического процесса, влияющего на это соотношение в локальных частях образца. Затем эта паста поступает на специальное оборудование, похожее на экструдер. Графитовая паста продавливается через формообразующие отверстия штампа и на выходе можно увидеть всем знакомый стержень карандаша. Получившуюся заготовку грифеля просушивают. Затем обжигают при высоких температурах в специальной печи. Во время обжига графит и глина соединяются, а стержень твердеет. Чем выше температура обжига – тем тверже будет карандаш. Чем меньше глины в составе грифеля и чем меньше температура обжига – тем карандаш будет мягче.

Приведенное тепловое поле грифеля на рис. 2а показывает наличие волнообразного изменения электрических и тепловых свойств по его длине, как результат особенностей технологического процесса изготовления.

В проведенном исследовании грифель подключался к источнику постоянного тока. Подавались напряжения различного уровня: от 5В и до 20В. В таблице 1 и на рис. 3 и 4 приведены данные по эксперименту.

Изображения тепловых полей при этих значениях напряжений были получены с помощью тепловизора с разрешением 240x360.

Таблица 1

Характеристики теплового поля грифеля при различном уровне подведенного напряжения

Характеристики	Подведенное напряжение, В			
	5	10	15	20
Ток в грифеле, А	0,03	0,07	0,11	0,16
Максимальная температура, °С	28,7	48,1	79,4	116,6
Сопротивление грифеля, Ом	166,66	142,86	136,36	125,0
Фрактальная размерность теплового поля, D	2,448	2,242	2,377	2,472
Среднеквадратическое отклонение, ρ_k	24,504	30,39	25,377	20,021
Математическое ожидание, ρ_k	123,685	129,923	143,562	150,268
Коэффициент вариации, %	19,81	23,39	17,68	13,32

При росте электрического напряжения на рис. 3 виден рост электрического тока, а на рис. 4 наблюдаются падение электрического сопротивления с 166,66 Ом при 5В до 125 Ом при 20В напряжения и рост температуры, что соответствует свойствам полупроводников (уменьшение электрического сопротивления на 24,99%). При этом шаг изменения напряжения 5В, а уменьшение электрического сопротивления происходит не пропорционально этому изменению.

Температура окружающей среды 22,2°C, гистограммы распределения температур показаны на рис. 5.

Наилучшие статистические данные по температурному распределению показало тепловое поле при 20В – имеет наименьший коэффициент вариации 13,32%, а наихудший показатель при напряжении 10В – 23,39%.

Температурные распределения визуально не похожи друг на друга, отличаются и в статистических характеристиках распределения – стандарт (среднеквадратичное отклонение), медианное (срединное значение) и математическое ожидание. Среднеквадратичное отклонение наибольшее при напряжении в 10В.

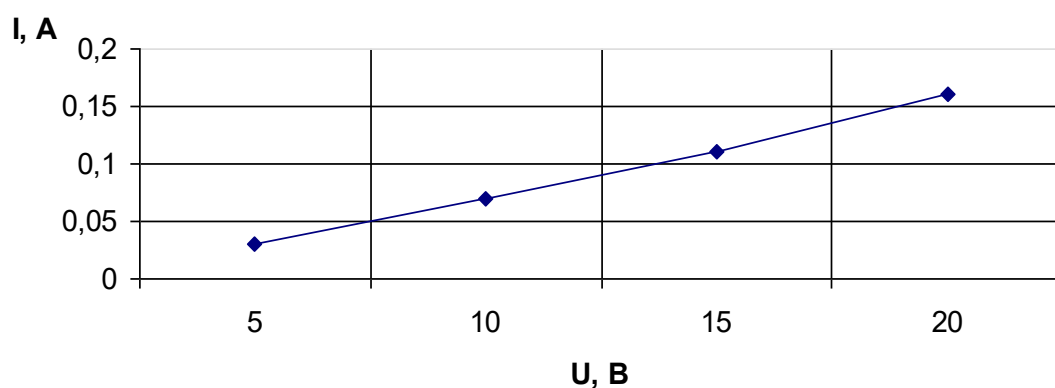


Рис. 3. График зависимости электрического тока в графитовом стержне от изменения уровня электрического напряжения

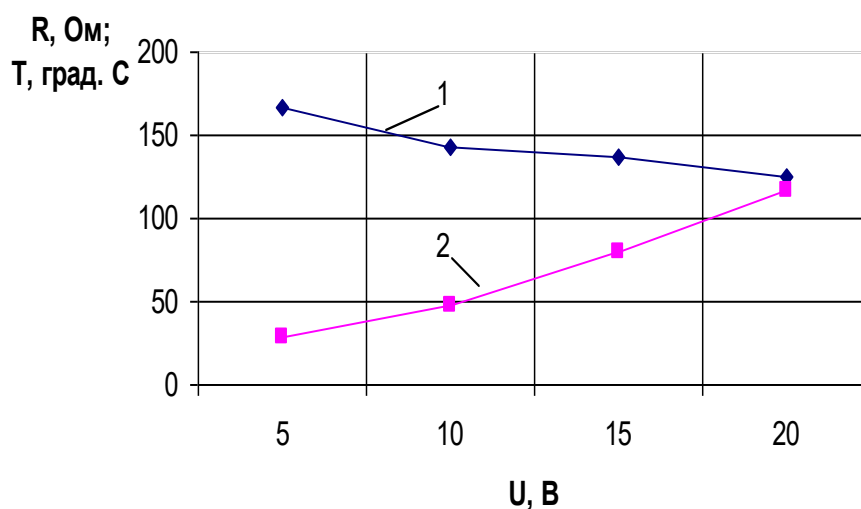


Рис. 4. Графики зависимости электрического сопротивления (1) и температуры (2) от уровня электрического напряжения

Рассмотрим фрактальные оценки изображений теплового поля. Фрактальная геометрия используется для описания самоподобных множеств, называемых фракталами [5]. Фрактальная размерность характеризует неравномерность и сложность структуры множества и является важной метрикой для анализа изображений с самоподобной структурой. Например, в работе [6] рассматриваются различные алгоритмы измерения фрактальной размерности, и производится численная оценка фрактальной размерности неподвижных цветных и черно-белых изображений двумя методами: методом триангуляции и дифференциальным методом подсчета клеток. Показано, что рассматриваемые методы оценки дают удовлетворительные результаты, погрешность которых не превышает 5%. Для практического использования рекомендуется использовать среднее арифметическое значений фрактальной размерности, найденных методом триангуляции и дифференциальным методом подсчета клеток.

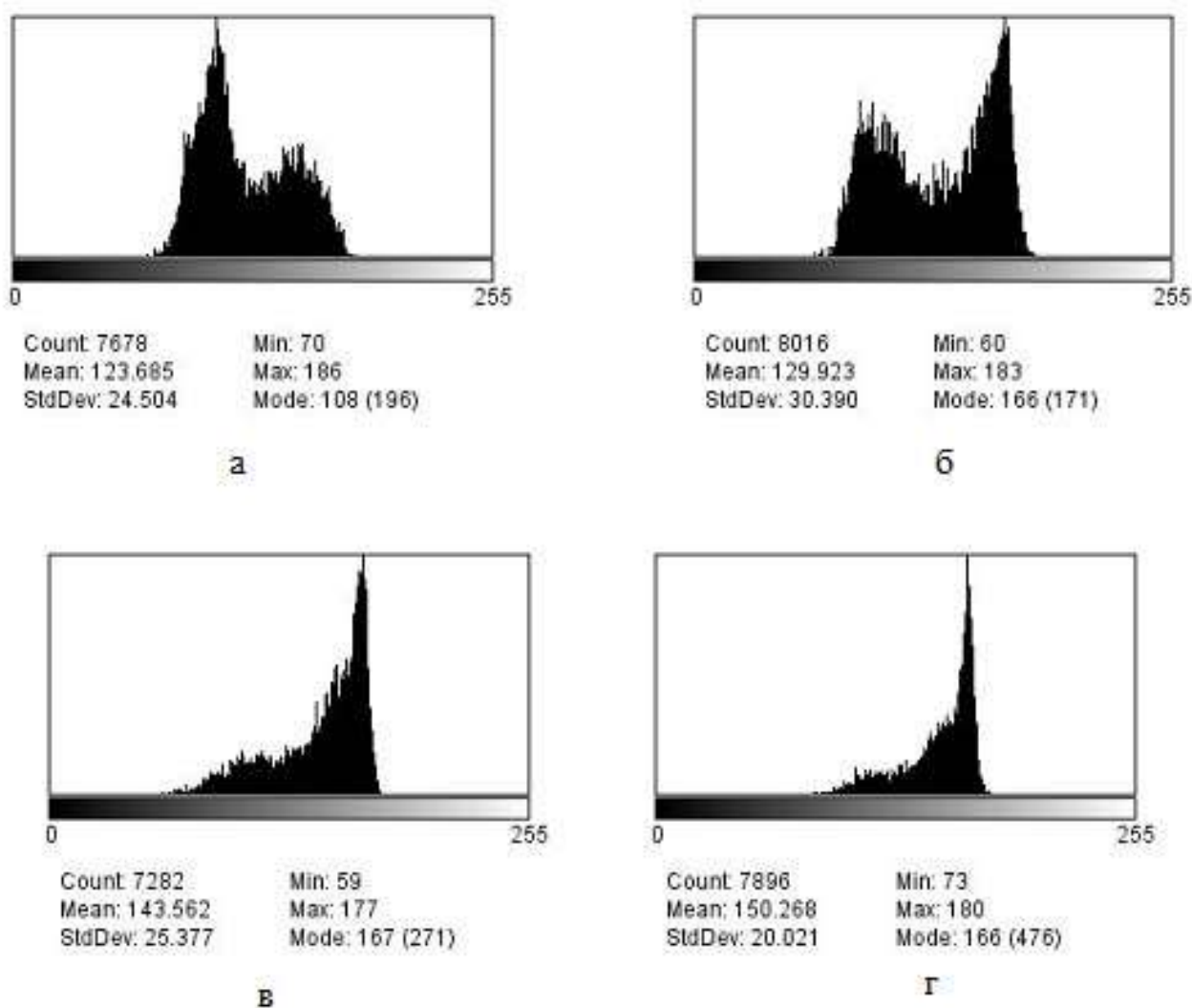


Рис. 5. Гистограммы распределения температур в тепловом поле графитового стержня: а – 5В; б – 10В; в – 15В и г – 20В

В нашем исследовании изображений тепловых полей используем результаты этих двух методов определения фрактальной размерности. Были получены следующие фрактальные размерности изображений теплового поля грифеля: 2,511, 2,507, 2,365 и 2,4482 [7]. Из сравнения этих величин следует, что гладкость профиля поверхности теплового поля несколько лучше при напряжении 15В.

Рассмотрим профили линий (рис.6), которые проходят вдоль стержня по оси симметрии изображения по вертикали. Они отличаются друг от друга. В зависимости от поданного напряжения меняется распределение температуры по линии профиля.

Рассмотрим структуру теплового поля графитового стержня – срединной области поля (рис. 2а). Для этого используем метод кластеризации изображения – определение близких областей с одинаковыми тепловыми характеристиками (температурами). Используем метод кластеризации K -средних, это простой метод разделения множества данных на K различных непересекающихся кластеров. Для выполнения кластеризации сначала нужно определить желаемое число кластеров K , затем алгоритм K -средних будет относить каждое наблюдение в точности к одному из K кластеров. Для своих исследований мы выбрали 10 кластеров. На рис. 7 приведены изображения этих кластеров по тепловому полю грифеля. Изображения тепловых полей использовались в области максимальных температур (центральная область теплового поля). Визуально видно, что изображение при подведенном напряжении 15В имеет структуру теплового поля более однородную, с мелкими кластерами. Если визуально изображения кластеров на рис. 7а и 7б похожи друг на друга, то изображение теплового поля на рис.7в отличается от них.

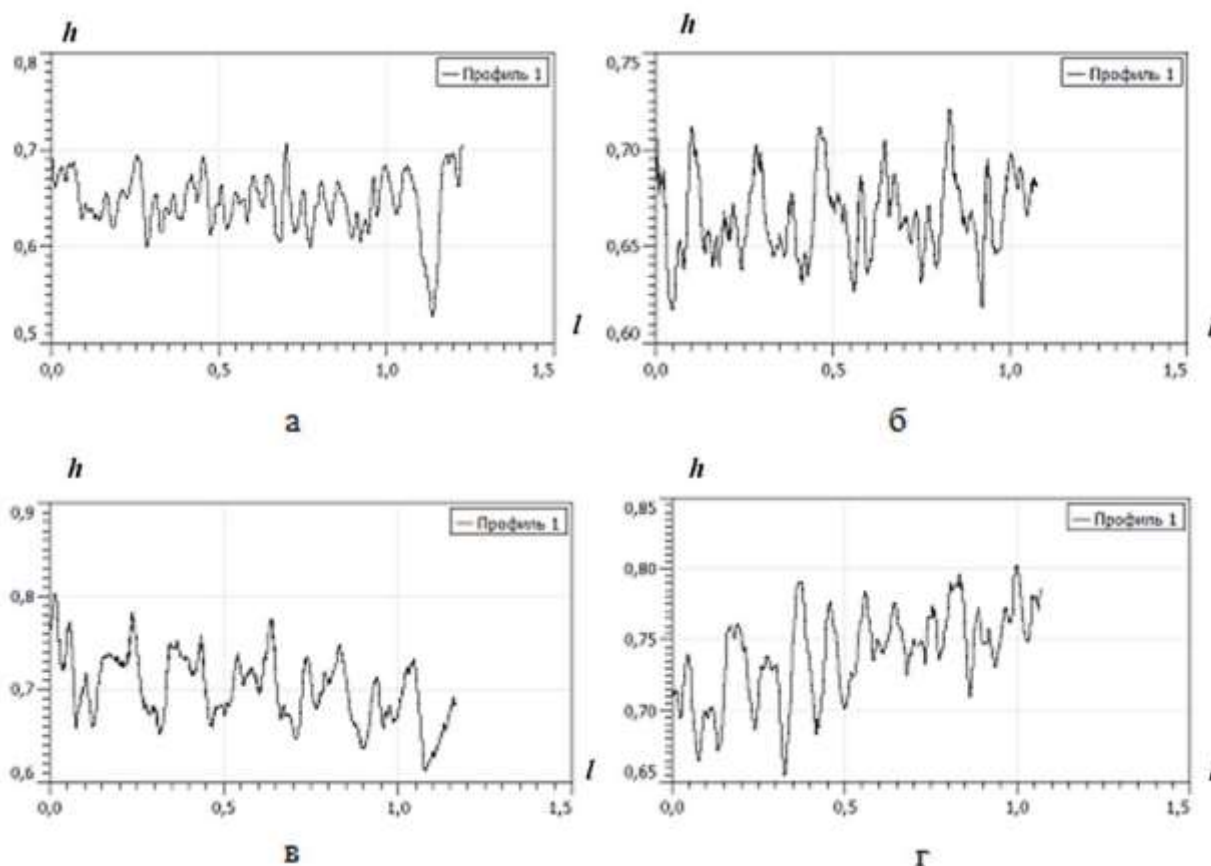


Рис. 6. Распределение температур по линии в относительных единицах h (профиль центральной линии теплового поля) при подведенном напряжении:

а – 5В, б – 10В, в – 15В, г – 20В

Для того чтобы определить различия в распределении кластеров по уровню температуры рассмотрим функцию связности Минковского, которая определяет отношение количества кластеров с различным уровнем температуры в диапазоне изменений от минимальной температуры и до максимальной в уровнях окрашенности пикселей.

На рис. 8 приведены графические изображения функции связности Минковского χ [7] для изображения тепловых полей при различном напряжении. Функции связности не являются гладкими, в отличие от гладких функций связности для однородных изображений [8]. Но при напряжении 15В она более приближена к гладкой функции связности. Это значит, что структура изображения более равномерная. Функции связности квазисимметричны. Максимальные значения функции связности χ отличаются незначительно. Срединная нулевая точка связности χ в районе (0,65-0,75) относительного температурного диапазона тепловых полей в окрашенности пикселей серого формата при различном напряжении (температурный диапазон в используемом относительном формате $z = 0 \dots 1,0$).

Изменения в температурном поле графитового стержня от подаваемого напряжения объясняются тем, что грифель является композиционным материалом, структура грифеля двухкомпонентна – матрица глина, наполнитель графит. У этих материалов физические свойства отличны друг от друга – электропроводность, теплопроводность, теплоотдача и тепловое расширение. К тому же электрическая проводимость монокристаллов графита анизотропна; в направлении, параллельном базисной плоскости, близка к металлической, в перпендикулярном – в сотни раз меньше. Минимальное значение проводимости наблюдается в интервале 300-1300К, причём положение минимума смещается в область низких температур для совершенных кристаллических структур. Наивысшую электрическую проводимость имеет рекристаллизованный графит.

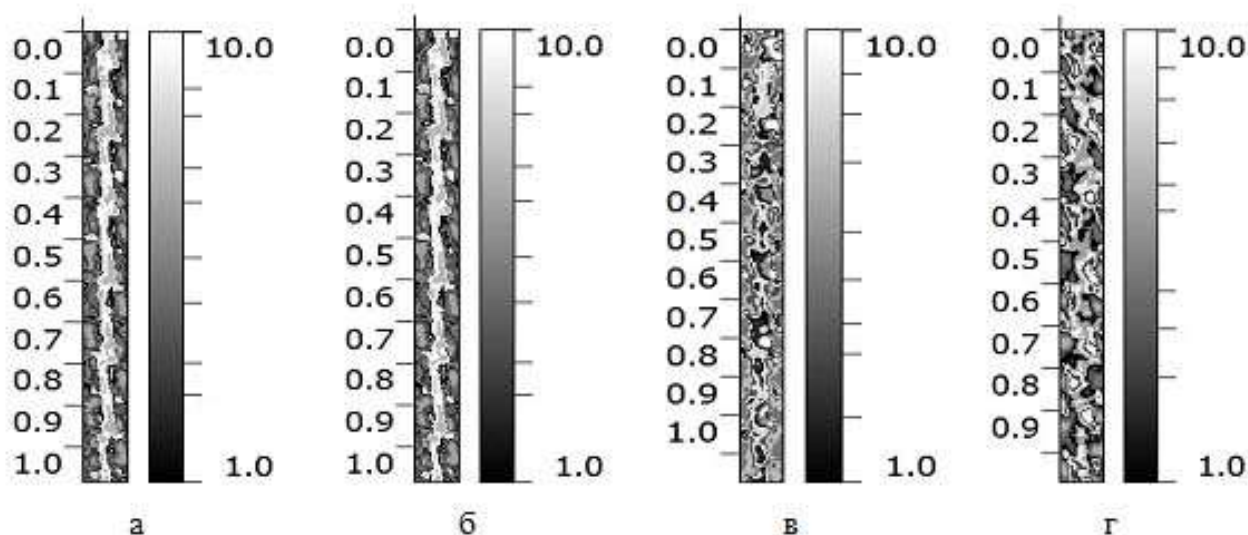


Рис. 7. Изображения распределения кластеров тепловых полей графитового стержня при различном уровне подведенного напряжения U : а – 5В, б – 10В, в – 15В, г – 20В

Коэффициент теплового расширения графита до 700К отрицателен в направлении базисных плоскостей (графит сжимается при нагревании), его абсолютное значение с повышением температуры уменьшается. Выше 700К коэффициент теплового расширения становится положительным. В направлении, перпендикулярном базисным плоскостям, коэффициент

теплового расширения положителен, практически не зависит от температуры и более чем в 20 раз выше среднего абсолютного значения для базисных плоскостей.

«Глинистые» материалы представляют собой сложные соединения из алюминия, кремния и воды. Они не только включают воду в свою структуру (такая вода называется химически связанной), но и удерживают ее в виде прослоек между частичками (такую воду называют физически связанной). В глине есть примеси таких веществ, как карбонат кальция, кварц, сульфид железа, гидроксид железа, оксид магния, оксид кальция и т.д. В зависимости от химического состава, выделяют такие глинистые материалы, как каолиниты, галлуазиты, иллиты и монтмориллониты.

Исходя из предназначения сырья, его нормируют в зависимости от того, каков процент оксидов железа, кварцевого песка, различных примесей. Степень огнеупорности материала зависит от содержания в нем глинозема.

Изменение электрического сопротивления графита в диапазоне изменения максимальной температуры стержня (при напряжении в интервале от 5В и до 20В) приблизительно на 10% [9]. Объяснение данного эффекта было дано выше. А у грифеля электрическое сопротивление в эксперименте изменилось на 24,99%. Эти отличия объясняются тем, что протекающий через систему электрический ток заставляет, с одной стороны, так ориентироваться частицы графита, что направление, в котором их проводимость максимальна, стремится приблизиться к направлению силовых линий электрического поля [10]. С другой стороны, степень неоднородности материала и тепловые процессы (тепловое расширение глины) влияют на проводимость. Описание этих эффектов возможно в рамках теории перколяции, фиксирующей порог проводимости [11] и ее изменение при определенном значении концентрации частиц графита.

Такое изменение электрического сопротивления вполне реально при различных соотношениях между неоднородностями (наполнителя и матрицы) в структурированных материалах, т.е. зависит от внешних и внутренних условий.

Теория перколяции (теория протекания или теория просачивания) – математическая теория, используемая в физике, химии и других областях науки для описания возникновения связанных структур в случайных средах (кластеров), состоящих из отдельных элементов [12].

Теория перколяции является наиболее общим подходом к описанию процессов переноса в неупорядоченных системах. В качестве примера перколяции в непрерывной среде может выступать прохождение жидкости через объёмный пористый образец (например, воды через губку из пенообразующего материала), в котором происходит постепенное надувание пузырьков до тех пор, пока их размеров не станет достаточно для просачивания жидкости от одного края образца до другого.

Совокупность элементов, по которым происходит протекание (воды, электричества, газа и т.д.), называется перколяционным кластером. Будучи по своей природе связным случайным графом, в зависимости от конкретной реализации он может иметь различную форму. В нашем случае при подведении напряжения каждого различного уровня образуется свой упорядоченный перколяционный кластер, тому способствуют различные физические свойства (электрическое сопротивление, теплоотдача, тепловое расширение) структурного состава грифеля.

Электрическое сопротивление грифеля уменьшается при повышении напряжения. Эта зависимость нелинейная. Полученные данные экспериментов с грифелем показали, что его электрические свойства зависят от концентрации частиц графита и их ориентации в стержне грифеля и подаваемого напряжения.

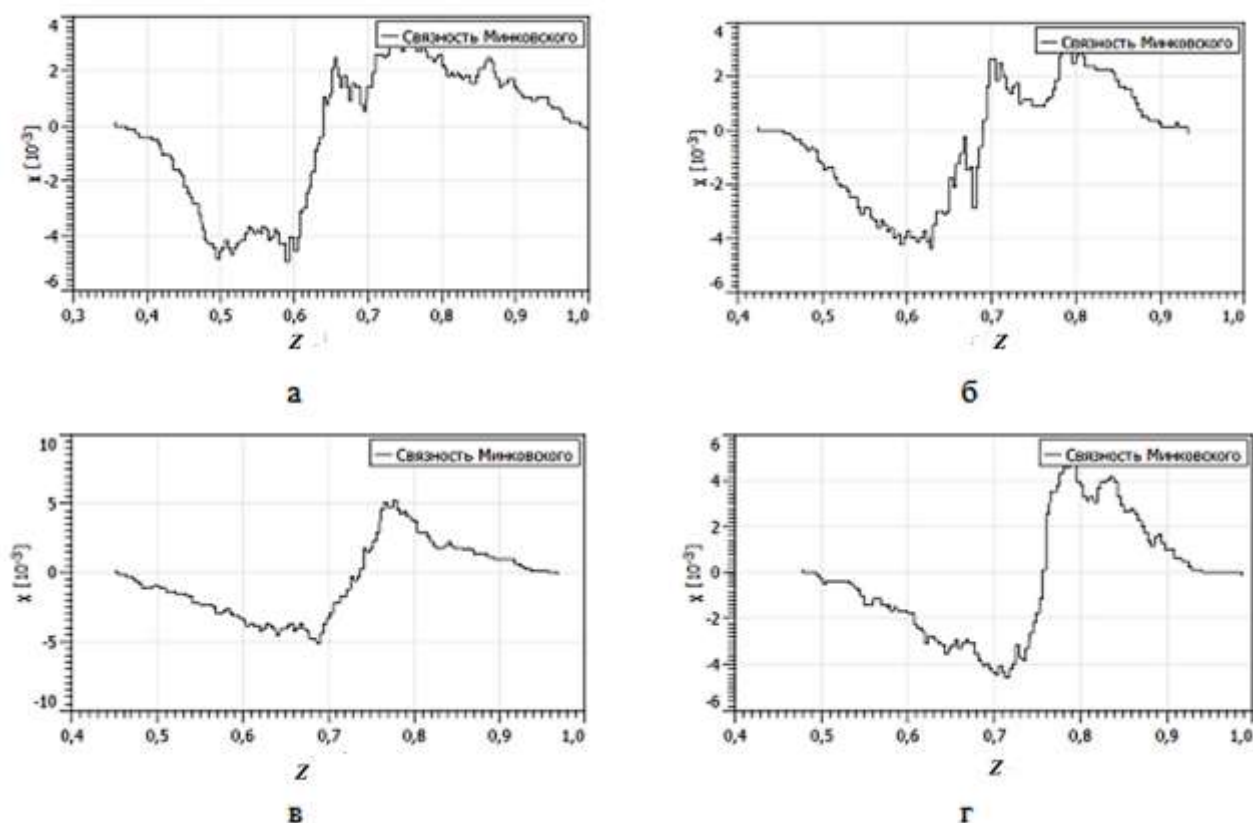


Рис. 8. Функции связности Минковского χ при различном уровне постоянного подведенного напряжения U : а – 5В, б – 10В, в – 15В, г – 20В

Выводы. Из полученных данных видно, что в зависимости от подведенного напряжения меняются характеристики теплового поля графитового стержня – из-за разных теплофизических свойств глины и изменяющейся электропроводности графита структура грифеля изменяется в зависимости от температуры самого стержня – меняется перколяционная структура электрической проводимости графитового стержня. С повышением подводимого напряжения сопротивление грифеля снижается, что соответствует свойствам полупроводниковых материалов.

Наиболее однородно тепловое поле для грифеля в выбранном диапазоне подводимого напряжения при 20В, а гладкость изменений температурного профиля линий по центру изображения грифеля проявилась при напряжении 15В. Это наглядно видно по функции связности Минковского и самому температурному профилю.

Также получено характерное изменение теплового поля вдоль стержня грифеля – волнообразное изменение электрического сопротивления, которое зависит от процесса экструдирования – волнообразное изменение плотности грифеля и как следствие этого волнообразное изменение локального электрического сопротивления.

По своей структуре грифель является композиционным материалом, у которого физические свойства зависят от параметров наполнителя и матрицы, их взаимодействия в электрическом и тепловом поле.

Список литературы

1. Ахметханов Р.С., Шульженко А.А. Анализ особенностей тепловых полей углеродных нитей разных типов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2021. – № 4. – С. 103 – 112.
2. 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.
3. Ахметханов Р.С., Шульженко А.А. Электропроводность и фрактальные свойства углеродных нитей // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2019. – № 6. – С. 99 – 105.
4. Гуревич А.Г. Физика твердого тела. Учебное пособие для вузов. – С-Пб.: Невский Диалект, 2004. – 320 с.
5. Шредер М. Фракталы, хаос, степенные законы. Миниатюры из бесконечного рая. – Ижевск: НИЦ Регулярная и хаотическая динамика, 2001. – 528 с.
6. Шелухин О.И., Магомедова Д.И. Анализ методов измерения фрактальной размерности цветных и черно-белых изображений // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2017. – Т. 9, № 6. – С. 6 – 16.
7. Клапетек П., Нечас Д., Андерсон К. Руководство пользователя Gwyddion: [сайт]. – 2004 – 2023. – URL: <http://gwyddion.net/documentation/user-guide-ru> (дата обращения: 22.03.2023).
8. Ахметханов Р.С. Фотометрический метод анализа многокомпонентных сред и конструкционных материалов // Вестник научно-технического развития. – 2022. – № 2 (165). – С. 1 – 11.
9. Физические свойства графита при заданной температуре (таблица) // Infotables.ru. Справочные таблицы: [сайт]. – 2014 – 2023. – URL: <https://infotables.ru/materialy/487-fizicheskie-svoystva-grafita-tablitsa> (дата обращения 22.03.2023).
10. Кенжалиев Б.К., Черноглазова Т.В., Мофа Н.Н., Дегтярева А.С., Курапов Г.Г., Сулейменов Э.Н. Локализация пластической деформации и неравновесные структурно-деформационные превращения. Избранные труды. – Алматы: Комплекс, 2004. – 271 с.
11. Аракелян С.М., Антипов А.А., Кучерик А.О., Кутровская С.В., Бухаров Д.Н. Особенности электропроводности наноструктурированных систем: учебное пособие. – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2015. – 108 с.
12. Эфрос А.Л. Физика и геометрия беспорядка. – М.: Наука, 1982. – 268 с.

Дата поступления: 22 мая 2023 г.