

РАЗРУШАЮЩИЕ ТЕРМОУПРУГИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ИЗ-ЗА ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ В ГАЗОВЫХ ВКЛЮЧЕНИЯХ В КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ

© 2018

Е.М. Волокобинский, инженер кафедры конструирования и технологии производства радиоэлектронных средств
*Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург (Россия)*

Ключевые слова: воздушные включения; композиционный материал; сильное электрическое поле; разрушение.

Аннотация: Статья посвящена рассмотрению такого важного явления в радиодеталях, как раскалывание в многокомпонентных материалах. Композиционные материалы являются важным классом радиоматериалов, поэтому улучшение комплекса их свойств носит важное фундаментальное и прикладное значение и является актуальным направлением материаловедения. Совершенствование композиционных материалов способствует их более широкому применению и изготовлению новых радиодеталей. Наряду с совершенствованием характеристик композиционных материалов значительный интерес для материаловедения представляют соединения, в которых применяются другие элементы, например редкоземельные (сплавы с празеодимом или самарием). Исследуется влияние термоупругих напряжений на работоспособность радиодеталей, содержащих композиционные материалы; выявляются физические факторы, наиболее сильно влияющие на функциональную пригодность изделий с композиционными материалами. Перед нами также стояла задача изучить механизмы возникновения и протекания термоупругого пробоя в композиционном материале, содержащем включения, в частности воздушные. Например, композиционный материал на металлической основе содержит десятки включений различного состава. Как правило, в композиционных материалах содержатся и воздушные включения, влияние которых также необходимо учитывать. Электрическая прочность и срок службы деталей из неоднородных композиционных материалов в сильных электрических полях зависят от содержания воздушных включений и их формы. В статье произведен расчет напряженности электрического поля во включениях и вблизи них. Рассмотрен процесс, происходящий в эллипсоидальном включении под действием сильного электрического поля. Проведен анализ относительного влияния формы крупных включений на механизм упрочнения. Отдельно анализируются процессы для мелких и для крупных включений в композиционном материале и их влияние на разрушение деталей из-за разрядов во включениях. Исследовано влияние комбинированного внешнего воздействия (различные температуры и т. д.). Установлено, что в сильных высокочастотных электрических полях тепловыделение вследствие ионизации в воздушных включениях в композиционных материалах может оказаться значительным, и при интенсивном внешнем воздействии могут иметься разрушающие напряжения. Неравномерный нагрев композиционного материала из-за тепловыделения в крупных включениях приводит к появлению разрушающих термоупругих напряжений и к раскалыванию радиодеталей.

ВВЕДЕНИЕ

Разогрев композиционного материала (КМ) в сильном электрическом поле может приводить к появлению разрушающих термоупругих напряжений. Рассматривается эллипсоидальное воздушное включение и производится расчет максимального тепловыделения под действием сильного электрического поля. Если к КМ приложено синусоидальное напряжение, то поле во включении не меняется по синусоидальному закону. Газ во включении пробивается, и в этот момент напряженность поля падает до нуля. В случае эллипсоидального воздушного включения происходят дискретные разряды, если выполняются два условия: заряд, осевший при пробое на поверхности включения, не меняется существенно за время одного периода; скорость изменения поля должна быть такой, чтобы при возрастании напряженности разряд успел погаснуть. В более крупных включениях разряды происходят чаще. Если не учитывать потери во всех включениях, которые пробивались раньше, то потери на пробой в воздушных включениях будут расти пропорционально E^2 .

Если в образцах из КМ имеются только мелкие включения, отсутствуют крупные газовые включения, то можно не учитывать энергию, затрачиваемую на ионизацию газа во включениях, так как она мала. Если в КМ содержатся крупные включения, то в сильных

электрических полях на радиочастотах тепловыделение в них весьма значительно, сопровождается неравномерным нагревом и приводит к раскалыванию изделий. Причиной разрушения КМ являются термоупругие напряжения, вызываемые неравномерным нагревом вследствие тепловыделения при разрядах в крупных включениях.

Неравномерный нагрев КМ из-за тепловыделения в крупных включениях приводит к появлению разрушающих термоупругих напряжений и к раскалыванию радиодеталей [1; 2].

Вопросы КМ сейчас приобретают все большее значение, но не обсуждаются причины наиболее опасного повреждения КМ – растрескивания (раскалывания). В настоящее время известно большое число экспериментальных фактов, которые касаются деформации КМ, вызываемой наличием крупных воздушных включений, но не приводящей к раскалыванию изделий [3–5].

В статье рассматривается пробой в сильном электрическом поле при наличии в КМ крупных газовых включений [6].

Цель работы:

1) изучение закономерностей влияния тепловыделения в исходных газовых включениях КМ на термоупругие напряжения, приводящие к разрушению. Исследование закономерностей влияния исходной структуры

и геометрических размеров формирующихся газовых включений на структуру и механические свойства КМ;

2) расширение области применения КМ благодаря определению влияния газовых включений на прочностные свойства.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В рамках теории термоупругого пробоя произведем расчет максимального тепловыделения вследствие ионизации газа в отдельном газовом включении под действием переменного электрического поля [7].

Пусть в КМ имеется эллипсоидальное воздушное включение с осью вращения, направленной вдоль вектора напряженности электрического поля E [8; 9].

Если напряженность электрического поля мала, то характер изменения электрического поля как в КМ, так и во включении одинаков, и тепловыделение во включении незначительно [10; 11].

Когда напряженность поля велика, то газ в воздушном включении ионизируется [12; 13]. Если к КМ приложено синусоидальное напряжение, то поле во включении уже не будет изменяться по синусоидальному закону [14; 15] (штриховая линия на рис. 1).

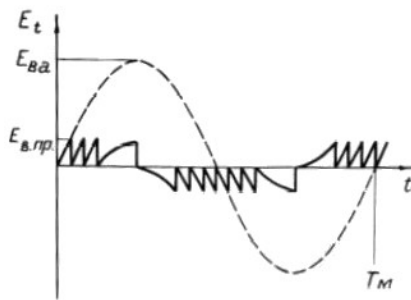


Рис. 1. Изменение напряженности электрического поля во включении со временем на переменном напряжении

Как только напряженность поля во включении E_t достигнет величины внутреннего пробивного напряжения $E_{B,пр}$, газ во включении пробьется, и напряженность поля в нем упадет до нуля [16; 17]. Газ во включении будет пробиваться каждый раз, когда напряженность поля в нем изменяется на величину $\Delta E_B = (+ \text{ или } -) E_{B,пр}$ [18].

Если бы разряды во включении не происходили [19], то амплитудное значение поля в эллипсоидальном включении $E_{B,a}$ равнялось бы

$$E_{B,a} = \frac{E_a}{1 - \frac{\epsilon_B - \epsilon_H}{\epsilon_H} \cdot \frac{K}{4}},$$

где ϵ_B и ϵ_H – диэлектрические проницаемости внутри и вне включения;

E_a – амплитудное значение поля в КМ;

K – функция, зависящая от формы включения.

Величина K определяется формулами:

$$K = f(\sqrt{F}),$$

$$K = f(\lg \sqrt{F}).$$

Обозначим через $E_{пр}$ минимальную напряженность поля в КМ, при которой во включении происходит пробой [20]. За один период T_M во включении будет происходить $4n$ разрядов, где n – целое число, определяемое из условия:

$$n = \frac{E_a}{E_{пр}} - b^* = \frac{E_{B,a}}{E_{B,пр}} - b^*,$$

где b^* – меньше единицы и положительно.

За одну секунду во включении будет происходить N разрядов:

$$N = 4nf,$$

где f – частота переменного поля.

Изменение напряженности электрического поля внутри включения E_t со временем t для случая, когда $E_a/E_{пр} = E_{B,a}/E_{B,пр} = 4$, представлено на рис. 1 ломаной сплошной линией.

В эллипсоидальном воздушном включении будут происходить дискретные разряды, если выполняются два условия. Во-первых, заряд, осевший при пробое на поверхности включения, не должен существенно изменяться за время одного периода, т. е. время релаксации рассеивания зарядов τ должно быть больше $1/f$, $\tau f > 1$. Во-вторых, скорость изменения поля должна быть мала для того, чтобы при возрастании напряженности до $E_{пр}$ разряд успел погаснуть.

В случае соблюдения этих условий можно вычислить выделяющееся во включении тепло.

В момент разряда в эллипсоидальном включении выделяется энергия, равная

$$W_p = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\Phi a^3}{3} \cdot \frac{\epsilon_H^2}{\frac{K}{4} \left[\epsilon_H - (\epsilon_B - \epsilon_H) \frac{K}{4} \right]} \cdot E_{пр}^2,$$

где $\Phi = c^2/a^2$;

a – полуось эллипсоида в направлении вектора напряженности электрического поля E в КМ;

c – перпендикулярная ей полуось.

Так как за одну секунду происходит $4nf$ пробоев, то мощность W , теряемая на разряды во включении, равна

$$W = -2 \frac{\Phi a^3}{3} \cdot \frac{\epsilon_H^2}{\frac{K}{4} \left[\epsilon_H - (\epsilon_B - \epsilon_H) \frac{K}{4} \right]} E_{пр}^2 n f.$$

Обозначая $E_a - b^* E_{пр} = E^*$, запишем:

$$W = -2 \frac{\Phi a^3}{3} \cdot \frac{\epsilon_H^2}{\frac{K}{4} \left[\epsilon_H - (\epsilon_B - \epsilon_H) \frac{K}{4} \right]} E_{пр} E^* f.$$

Разрушение детали цилиндрической формы в электрическом поле происходит при напряжении

$$U_p = E_p L = 3,8 \cdot 10^5 \frac{L}{R} \sqrt{\frac{K}{\epsilon \lg \delta} \cdot \frac{(1-\mu) \sigma_p}{\alpha E_y}}. \quad (1)$$

где σ_p – разрушающее напряжение;
 K – коэффициент теплопроводности КМ;
 E_p – разрушающая напряженность электрического поля;
 L – длина детали;
 R – радиус детали;
 ε – диэлектрическая проницаемость;
 $\operatorname{tg}\delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь;
 μ – коэффициент Пуассона;
 α – коэффициент линейного расширения.

Сила F , вызывающая разрыв детали, находящейся в электрическом поле, может быть определена по формуле

$$F = \pi R^2 \left(\sigma_p - \frac{\varepsilon \operatorname{tg}\delta f E^2 \alpha E_y}{1,44 \cdot 10^{11} K (1 - \mu)} \right). \quad (2)$$

где E_y – модуль упругости;
 f – частота электрического поля.

Предельные частоту и напряжение, при которых сила достигает разрушающего значения, следует вычислить по (1) и (2). Необходимо принять меры, чтобы частота и напряжение не превосходили предельного значения.

Необходимо установить такие режимы работы аппаратуры, при которых частота и напряжения не достигают предельного значения (разрушающего).

Можно, разрушив деталь, экспериментально определить, при каких частоте и напряженности электрического поля это произошло. В производственных условиях тогда мы можем подбирать оптимальные значения частоты и напряженности электрического поля в соответствии с (1) и (2), в соответствии с имеющимся оборудованием.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В сильных полях, когда можно пренебречь $E_{пр}$ по сравнению с E_a , мощность, рассеиваемая во включении, линейно возрастает с увеличением напряженности электрического поля, т. е. с повышением E_a . В рабочих условиях E_a незначительно превосходит $E_{пр}$, и фактически во включении происходит четыре разряда за один период.

Рассеиваемая во включении мощность при постоянном $E_{пр}$ линейно возрастает с увеличением частоты. Однако уменьшение $E_{пр}$ с повышением частоты приводит к более слабой зависимости тепловыделения во включении от частоты. При высоких частотах во включении выделяется несколько меньшая мощность, если при расчетах W подставляется $E_{пр}$, определяемая на постоянном напряжении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гефле О.С., Лебедев С.М., Ткаченко С.Н. Поведение полимерных композиционных материалов с наполнителем из сегнетоэлектрической керамики в электрическом поле // Известия Томского политехнического университета. 2005. Т. 308. № 4. С. 64–68.
- Казанчан Г.П., Казанчан А.П., Гаспарян М.С. Влияние барьеров на распределение электрического поля в изоляции // Электричество. 1991. № 5. С. 35–38.
- Sarma G.B., Radhakrishnan B., Zacharia T. Finite Element Simulations of Cold Deformation at the Mesoscale // Computational Materials Science. 1992. № 12. С. 105–123.
- Полонский Ю.А., Орданьян С.С., Вихман С.В., Егоров Н.Ю., Егоров В.М. Теплофизические свойства композиционного материала для силовых резисторов на основе часовьярской глины и шунгита // Электротехника. 2007. № 3. С. 38–41.
- Кочергина Ю.А., Карьев Л.Г., Федоров В.А., Плужникова Т.Н. Образование малоразмерных структур в ионных кристаллах при имплантации металла в условиях термоэлектрического воздействия // Материаловедение. 2011. № 10. С. 38–41.
- Карьев Л.Г., Кочергина Ю.А., Мексичев О.А., Федоров В.А., Манухина Д.В. Моделирование состава поверхностей ионных кристаллов, формируемых термоэлектрическим воздействием // Наукоемкие технологии. 2012. Т. 13. № 4. С. 23–29.
- Федоров В.А., Кочергина Ю.А., Карьев Л.Г. Поверхностные малоразмерные структуры, образующиеся в ионных кристаллах при легировании металлами под действием тепловых и электрических полей // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2013. Т. 10. № 1. С. 31–34.
- Кочергина Ю.А., Федоров В.А., Карьев Л.Г. Образование поверхностных малоразмерных структур в ЦГК при термоэлектрическом воздействии // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. 2008. Т. 13. № 1. С. 65–66.
- Son S.-B., Roh H., Kang S.H., Chung H.-S., Kim D.H., Choi Y.S., Cho J.S., Moon J.-T., Oh K.H. Relationship between microstructure homogeneity and bonding of ultrafine golden wire // Gold Bulletin. 2011. Vol. 44. № 4. P. 231–237.
- Зайцев Ю.С., Кочергин Ю.С., Пактер М.К., Кучер Р.В. Эпоксидные олигомеры и клеевые композиции. Киев: Наукова думка, 1990. 198 с.
- Чернин И.З., Смехов Ф.М., Жердев Ю.В. Эпоксидные полимеры и композиции. М.: Химия, 1982. 230 с.
- Petrie E.M. Epoxy Adhesive Formulations. USA: McGRAW-HILL, 2006. 536 p.
- Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. СПб.: Научные основы и технологии, 2008. 822 с.
- Зеленский Э.С., Куперман А.М., Горбаткина Ю.А., Берлин А.А., Иванова-Мумжиева В.Г. Армированные пластики – современные конструкционные материалы // Российский химический журнал. 2001. Т. XLV. № 2. С. 56–74.
- Строганов В.Ф. Молекулярная подвижность в эпоксидных олигомер-полимерных системах. Черноголовка: ИХФ, 1997. 34 с.
- Ричардсон М. Промышленные композиционные материалы. М.: Химия, 1980. 472 с.
- Липатова Ю.С. Физико-химия многокомпонентных полимерных систем. Т. 2. Киев: Наукова думка, 1986. 384 с.
- Васильева В.В., Тарнопольский Ю.М. Композиционные материалы. М.: Машиностроение, 1980. 512 с.
- Альперин В.В., Корольков Н.В., Мотавкин А.В. Конструкционные стеклопластики. М.: Химия, 1979. 360 с.
- Загидуллин А.И., Ефремова А.А., Гарипов Р.М., Дебердеев Р.Я. Влияние реакционноспособных

модификаторов на свойства эпоксидных композиций // Вестник Казанского технологического университета. 2003. № 1. С. 313–319.

REFERENCES

1. Gefle O.S., Lebedev S.M., Tkachenko S.N. Behavior of polymeric composite materials with ferroelectric ceramics in electric field. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2005, vol. 308, no. 4, pp. 64–68.
2. Kazanchan G.P., Kazanchan A.P., Gasparyan M.S. The influence of barriers on the distribution of the electric field in insulators. *Electrical technology USSR*, 1991, no. 2, pp. 79–84.
3. Sarma G.B., Radhakrishnan B., Zacharia T. Finite Element Simulations of Cold Deformation at the Meso-scale. *Computational Materials Science*, 1992, no. 12, pp. 105–123.
4. Polonskii Yu.A., Ordan'yan S.S., Vikhman S.V., Egorov N.Yu., Egorov V.M. The thermophysical properties of composite material for power resistors based on Chasovyyar clay and schungite. *Russian Electrical Engineering*, 2007, vol. 78, no. 3, pp. 143–145.
5. Kochergina Yu.A., Karyev L.G., Fedorov V.A., Pluzhnikova T.N. Formation of low-dimensional structures in ionic crystals during implantation of metal under thermoelectric treatment. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2012, vol. 3, no. 4, pp. 271–274.
6. Karyev L.G., Kochergina Yu.A., Meksichev O.A., Fedorov V.A., Manukhina D.V. Modelling condition surfaces of ionic crystals, formed by thermoelectric influence. *Naukoemkie tekhnologii*, 2012, vol. 13, no. 4, pp. 23–29.
7. Fedorov V.A., Kochergina Yu.A., Karyev L.G. Low-dimensional structures of surface formed in ionic crystals during alloying metal under the influence of heat and electric fields. *Fundamentalnye problemy sovremennogo materialovedeniya*, 2013, vol. 10, no. 1, pp. 31–34.
8. Kochergina Yu.A., Fedorov V.A., Karyev L.G. Formation of superficial small size structures in alkali halide crystals under thermoelectric influence. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2008, vol. 13, no. 1, pp. 65–66.
9. Son S.-B., Roh H., Kang S.H., Chung H.-S., Kim D.H., Choi Y.S., Cho J.S., Moon J.-T., Oh K.H. Relationship between microstructure homogeneity and bonding of ultrafine golden wire. *Gold Bulletin*, 2011, vol. 44, no. 4, pp. 231–237.
10. Zaytsev Yu.S., Kochergin Yu.S., Pakter M.K., Kucher R.V. *Epoksidnye oligomery i kleevye kompozitsii* [Epoxy oligomers and glue compositions]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1990. 198 p.
11. Chernin I.Z., Smekhov F.M., Zherdev Yu.V. *Epoksidnye polimery i kompozitsii* [Epoxy polymers and compositions]. Moscow, Khimiya Publ., 1982. 230 p.
12. Petrie E.M. *Epoxy Adhesive Formulations*. McGRAW-HILL, 2006. 536 p.
13. Mikhaylin Yu.A. *Konstruksionnye polimernye kompozitsionnye materialy* [Structural polymer composite materials]. Sankt Petersburg, Nauchnye osnovy i tekhnologii Publ., 2008. 822 p.
14. Zelenskij E.S., Kuperman A.M., Gorbatkina Yu.A., Ivanova-Mumzhieva V.G., Berlin A.A. Reinforced plastics are modern structural materials. *Rossiiskij Khimicheskij Zhurnal (Zhurnal Rossijskogo Khimicheskogo Obshchestva Im. D.I. Mendeleeva)*, 2001, vol. 45, no. 2, pp. 56–75.
15. Stroganov V.F. *Molekulyarnaya podvizhnost' v epoksidnykh oligomer-polimernykh sistemakh* [Molecular mobility in epoxy oligomer-polymer systems]. Chernogolovka, IKhF Publ., 1997. 34 p.
16. Richardson M. *Promyshlennye kompozitsionnye materialy* [Industrial composite materials]. Moscow, Khimiya Publ., 1980. 472 p.
17. Lipatova Yu.S. *Fiziko-khimiya mnogokomponentnykh polimernykh sistem* [Physicochemistry of multi-component polymer systems]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1986. Vol. 2, 384 p.
18. Vasilyeva V.V., Tarnopolsky Yu.M. *Kompozitsionnye materialy* [Composite materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980. 512 p.
19. Alperin V.V., Korolkov N.V., Motavkin A.V. *Konstruksionnye stekloplastiki* [Structural fiberglass]. Moscow, Khimiya Publ., 1979. 360 p.
20. Zagidullin A.I., Efremova A.A., Garipov R.M., Deberdeev R.Ya. Effect of reactive modifiers on the properties of epoxy compositions. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2003, no. 1, pp. 313–319.

THE DESTRUCTIVE THERMOELASTIC STRESSES CAUSED BY HEAT OUTPUT IN GAZ INCLUSIONS IN COMPOSITE MATERIALS

© 2018

E.M. Volokobinsky, engineer of Chair of Designing and Technology of Production of Radioelectronic Facilities
Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications, Saint-Petersburg (Russia)

Keywords: air inclusions; composite material; strong electric field; destruction.

Abstract: The paper considers such important phenomenon in radio components as the cleavage in multicomponent materials. Composite materials are the important class of radio materials, thus the improvement of complex of their properties has the important fundamental and applied significance and is the up-to-date sector of the material science. The improvement of composite materials contributes to their wider application and production of new radio components. Alongside with the composite materials properties' improvement, the compounds where other elements, for example, rare-earth (alloys with praseodymium or samarium) are applied are of considerable interest. The paper studies the influence of thermoelastic stresses on the performance capacity of radio components containing composite materials, identifies physical factors influencing most greatly the operational suitability of the products with the composite materials. The author had an objective to study the mechanisms of initiation and behavior of a thermoelastic breakdown in a composite material containing the inclusions, in particular, air inclusions. For example, metal-based composite material contains dozens of inclusions of various compositions. As a rule, composite materials contain air inclusions the influence of which should be taken into account as well. The electrical strength and the service life of the details produced from the non-homogeneous composite materials within the strong electric fields depend on the content of air inclusions and their shape. The paper presents the calculation of the electric field strength in the inclusions and near them. The author considered the process taking place in an ellipsoidal inclusion under the influence of strong electric field and analyzed the relative influence of large inclusions' shape on the hardening mechanism. The processes for small and large inclusions in a composite material and their influence on the destruction of the details caused by the discharges in the inclusions are considered separately. The influence of complex external action (different temperatures, etc.) is studied. It is identified that the heat generation caused in the strong high-frequency fields by the ionization in air inclusions in composite materials can be significant and, under the strong external actions, the destructive stresses can occur. The uneven heating of a composite material leads to the appearance of destructive thermoelastic stresses and to the cleavage of radio components caused by the heat generation in large inclusions.