

УДК 629.7.063.6

Вишняков Л. Р.¹, Коханый В. А.¹, Чернявский И. И.², Коханая И. Н.¹, Ободеева И. Н.¹¹Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины. Украина, г. Киев²Государственное предприятие «АНТОНОВ». Украина, г. Киев

РАСЧЕТ И ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ АНИЗОТРОПНЫХ СЕТЧАТЫХ МОЛНИЕОТВОДОВ ДЛЯ ЛИСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКОВ

Для сетчатых молниезащитных покрытий, используемых на листовых конструкционных компонентах из углепластиков, предложены метод расчета и методика определения среднекругового поверхностного электросопротивления. Такие расчеты и измерения позволяют оптимизировать направление расположения сетки на углепластике и проводить неразрушающий контроль качества изготовления сетеполотна, исходя из необходимости уменьшения его анизотропии.

Ключевые слова: молниезащита; сетеполотна; анизотропия; электросопротивление; токоотвод.

Введение

В авиационной технике и ветроэнергетике в последние годы применяются предложенные нами вязаные и вязано-паяные сетеполотна для молниезащиты конструкционных углепластиков [1–3]. Такие проволочные сетки располагают на поверхности внешнего контура изделий из композитов. Сетеполотна, выполненные из проволочных петель, представляют собой различные сочетания электрически связанных структурных элементов с требуемой анизотропией физико-механических свойств, включая электропроводность.

С целью более равномерного отвода электрических зарядов и тепла от точки привязки молнии по поверхности защищаемого объекта весьма важно применять сетчатые токоотводы с уменьшенной анизотропией свойств.

Цель работы

Чтобы обеспечивать неразрушающий контроль сетчатых полотен, а также осуществлять оптимальную ориентацию и выкройку полотна по отношению к шинам-токоотводам детали из углепластика (при минимальной анизотропии электропроводности), следует рассмотреть конкретные типы нескольких видов промышленно производимых сетчатых молниеотводов, предложить метод расчета электросопротивления и аппаратурно реализовать способ такого контроля. Указанные задачи и явились целью данной работы.

Постановка задачи и исследования

На рис. 1 изображены молниеотводящие вязаные и вязано-паяные сетки, а их массо-геометриче-

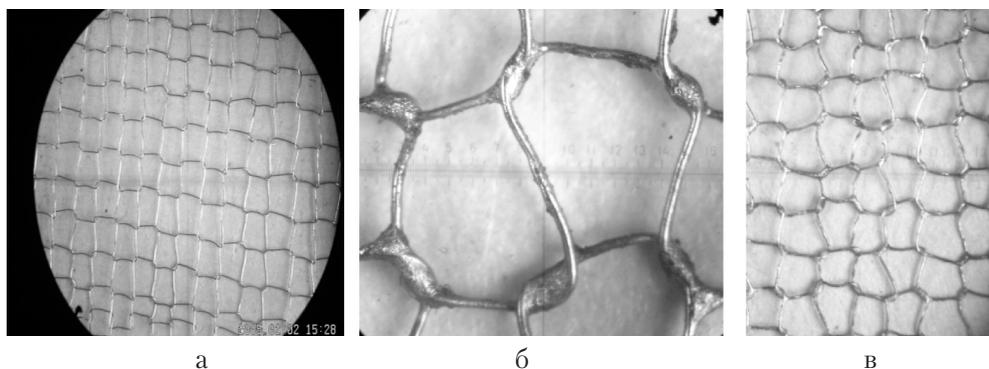


Рис. 1. Внешний вид вязаных (а) и вязано-паяных (б, в) молниеотводов марок: а – МЭ-0,08; б, в – МЭУ-0,12

Плотность, строение и механические характеристики молниеотводов, производимых промышленностью

| № п.п. | Тип молниеотвода | Поверхностная плотность, г/м ² | Плотность вязания (количество петель) | | Механические свойства | | | |
|--------|---|---|---------------------------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|-------------------|---------------------|
| | | | Вдоль полотна, Пв | Поперек полотна, Пг | Разрывная нагрузка, Н | | Деформация, % | |
| | | | | | Вдоль полотна, Пв | Поперек полотна, Пг | Вдоль полотна, Пв | Поперек полотна, Пг |
| 1 | МЭУ-0,08 ТУ У 28.7-24377962-010-2011 | 76 | 52 | 40 | 17,2 | 15,7 | 82,4 | 160,4 |
| 2 | МЭУ-0,12 ТУ У 28.7-24377962-010-2011 | 140 | 55 | 33 | 34,5 | 25,6 | 117,6 | 180,2 |
| 3 | МЭУ-0,08 ТУ У 28.7-24377962-009-2011 | 92 | 65 | 36 | 35,4 | 27,3 | 15,2 | 32,3 |
| 4 | МЭУ-0,12 ТУ У 28.7-24377962-009-2011 | 167 | 51 | 34 | 43,5 | 38,5 | 16,5 | 36,2 |

ские характеристики и механические свойства показаны в таблице 1. Отметим, что плотность расположения проволочных петель в направлении вязания полотна и поперек его также характеризует анизотропное строение каждого варианта сетки, и, как показали наши измерения, итоговую анизотропию прочности и электропроводности сетеполотна.

При расчете электросопротивления материала сетчатого полотна мы принимаем, что стекание электрических зарядов по молниеотводу происходит от точки привязки молнии (эпицентра её попадания) в радиальных направлениях.

На рис. 2 показана 4-х электродная схема, принятая нами для расчета удельного кругового поверхностного электросопротивления сетеполотна. Она состоит из двух токовых и двух потенциальных кольцевых электродов.

Методика расчета удельного кругового поверхностного электросопротивления сетеполотна с использованием этой схемы и включает расчет электросопротивления элементарного кругового пояса сетеполотна.

На рис. 3 показаны необходимые расчетные составляющие для вычисления поверхностного электросопротивления элементарного кругового пояса EFKL бесконечно малой ширины, обозначенной R_s^i и сектора сетеполотна ABCD, обозначенного $R_s^{сект}$.

Из рис. 3 следует, что поверхностное электросопротивление элементарного кругового пояса, R_s^i , равно:

$$R_s^i = \frac{2\rho_s^0 \Delta r}{\pi r_{II}}, \quad (1)$$

где ρ_s^0 – среднекруговое поверхностное удельное электрическое сопротивление сетеполотна.

Общее круговое поверхностное электросопротивление сектора сетеполотна ABCD равно сумме поверхностных электросопротивлений элементарных круговых поясов в интервале зоны действия потенциальных электродов

$$R_s^{сект} = \lim_{\Delta r \rightarrow 0} \sum_{i=r_{вн}}^{r_{нар}} R_s^i = \lim_{\Delta r \rightarrow 0} \sum_{i=r_{вн}}^{r_{нар}} \frac{2\rho_s^0 \Delta r}{\pi r_{II}}, \quad (2)$$

отсюда:

$$R_s^{сект} = \frac{2\rho_s^0}{\pi} \int_{r_{вн}}^{r_{нар}} \frac{dr}{r} = \frac{2\rho_s^0}{\pi} \ln \frac{r_{нар}}{r_{вн}}. \quad (3)$$

Поверхностное электросопротивление круга представляет параллельное соединение 4-х секторов. Оно равно:

$$R_s^0 = \frac{1}{4} \cdot \frac{2\rho_s^0}{\pi} \cdot \ln \frac{r_{нар}}{r_{вн}} = \frac{\rho_s^0}{2\pi} \cdot \ln \frac{r_{нар}}{r_{вн}}. \quad (4)$$

Удельное круговое электросопротивление сетеполотна из (4) принимает вид:

$$\rho_s^0 = \frac{2\pi R_s^{сект}}{\ln \frac{r_{нар}}{r_{вн}}}. \quad (5)$$

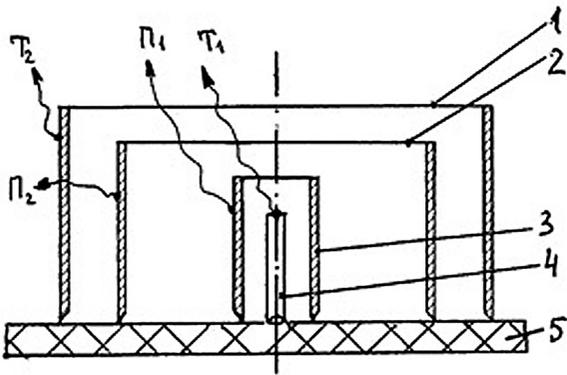


Рис. 2. Схема 4-х электродного устройства для измерения кругового поверхностного электросопротивления сетеполотна: 1, 4 – токовые электроды; 2, 3 – потенциальные электроды; 5 – образец сетеполотна; T_1, T_2 – токоподводы токовых электродов; P_1, P_2 – токоподводы потенциальных электродов

На рис. 4 представлено приспособление, которое материализует расчетную схему (рис. 2 и 3).



Рис. 4. Приспособление для измерения кругового электросопротивления

Сравнительные данные по расчету удельных поверхностных электросопротивлений молниеотводов, полученные по результатам измерения поверхностного электросопротивления сетеполотна линейным и круговым (по формуле 5) способом, представлены в таблице 2.

Как видно из таблицы 2, значения среднекругового удельного поверхностного сопротивления лежат в интервале значений линейных поверхностных удельных сопротивлений вдоль и поперек сете-

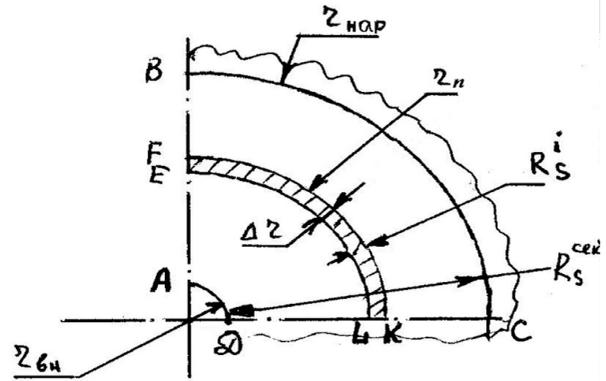


Рис. 3. Расчетная схема удельного кругового поверхностного электросопротивления сетеполотна: $r_{нар}$ – радиус внешнего потенциального электрода; $r_{вн}$ – радиус внутреннего потенциального электрода; r_n – радиус элементарного кругового пояса; Δz – ширина элементарного кругового пояса; R_s^i – поверхностное электрическое сопротивление элементарного кругового пояса; $R_s^{сек}$ – поверхностное электрическое сопротивление сектора сетеполотна

полотна молниеотвода. Коэффициент анизотропии сетеполотна может быть вычислен по формуле:

$$k = \frac{\Delta \rho_s}{\rho_s^0}, \quad (6)$$

где $\Delta \rho_s$ – разность значений линейных поверхностных электросопротивлений вдоль и поперек полотна молниеотвода, ρ_s^0 – удельное среднекруговое поверхностное сопротивление.

Предложенная методика расчета позволяет произвести расчет электропроводности сетеполотна в радиальном направлении, т.е. в направлении стока зарядов молнии от эпицентра её попадания в углепластик. Изготовленное для реализации этой методики приспособление служит надежным способом определения качества молниеотводящего полотна по параметру электропроводности и её анизотропии.

В технологии изготовления сетчатых молниеотводов, их раскроя по чертежу детали из углепластика, а также при проведении ремонтов сетчатого покрытия после поражения молнией использование разработанных методов расчета, контроля и измерения электросопротивления является важным инструментарием производственной деятельности.

Эффективность молниезащиты плакированного сетеполотном листового углепластика оценивалась нами на стандартном высоковольтном испытательном стенде в НИПКИ «Молния» НТУ ХПИ, г. Харьков, который в соответствии с авиационными квалификационными требованиями КТ-160Д имеет четыре токовых компонента А, В, С, Д прямого воздействия молнии. Эти компоненты в зависимости от зоны поражения молнии могут быть использованы в различных сочетаниях [4].

Электрические характеристики образцов молниеотводов

| № п.п. | Тип молниеотвода | Удельное линейное поверхностное сопротивление ρ_s (МОм) | | Удельное средне-круговое поверхностное сопротивление $\rho_s^{\text{ср}}$ (МОм) | Коэффициент анизотропии линейного поверхностного удельного сопротивления, k_a , % | Рекомендуемый угол поворота сетеполотна молниеотвода при формовании углепластиковых пластин, ω , град. |
|--------|------------------|--|---|---|---|---|
| | | Вдоль полотна (вдоль петельных столбиков) | Поперек полотна (поперек петельных столбиков) | | | |
| 1 | МЭ 0,08 | 23,76 | 7,64 | 16,53 | 97,5 | 49,6 |
| 2 | МЭ 0,12 | 13,44 | 5,62 | 11,4 | 68,6 | 66,5 |
| 3 | МЭУ 0,08 | 4,42 | 4,86 | 4,72 | 9,3 | 61,5 |
| 4 | МЭУ 0,12 | 3,25 | 3,55 | 3,36 | 8,9 | 33,1 |

При изготовлении испытательных углепластиковых панелей для разрядных испытаний важно правильно ориентировать сетеполотно при наформовке на углепластик под углом (ω) относительно шин токоотводов, которые расположены по двум противоположным сторонам испытательного стола. Это необходимо для усреднения тепловых нагрузок, воздействующих на панель, и снижения действия анизотропии молниезащитного сетеполотна.

Путем несложных математических преобразований получена формула для расчета этого угла

$$\omega = \frac{\left(1 - \frac{\rho_s^{\min}}{\rho_s^{\text{ср}}}\right)}{2k_a}, \quad (7)$$

где ρ_s^{\min} – минимальное линейное удельное поверхностное электросопротивление сетеполотна;

$\rho_s^{\text{ср}}$ – среднекруговое удельное поверхностное электросопротивление сетеполотна; k_a – коэффициент анизотропии линейных удельных поверхностных электросопротивлений.

Как показала практика, ориентация сетеполотна на панели по формуле (7) существенно уменьшает анизотропию распределения зарядов и снижает площадь разрушения панели при проведении имитированного разряда молнии на испытательном стенде.

Выводы

1. Представлены характеристики нескольких применяемых в настоящее время вязаных и вязанопаяных сетчатых молниеотводов для защиты листовых углепластиков от поражения действия разрядом молнии.

2. Учитывая радиальный характер стока зарядов молнии от эпицентра её попадания для расчета тепловых и электрических нагрузок действия молнии на композит, предложено ввести среднекруговое удельное поверхностное электросопротивление сетеполотна молниеотвода.

3. Предложен 4-электродный метод измерения среднекругового поверхностного электросопротивления сетеполотна молниеотвода и реализована методика измерения его удельного поверхностного электросопротивления.

4. Рассчитан и рекомендован угол поворота сетеполотна молниеотвода при формировании углепластиковых панелей для высоковольтных испытаний в НИПКИ «Молния»

5. Методика определения среднекругового поверхностного удельного электросопротивления может быть использована как метод неразрушающего контроля определения удельного поверхностного электросопротивления различных плоских объектов.

6. Эта методика может быть использована как метод неразрушающего контроля при определении качества сетеполотна по удельному поверхностному электросопротивлению различных сетеполотен, а также для проведения производственных и ремонтных операций с молниезащитными сетками.

Литература

- [1] Вишняков Л. Р. Разработка и внедрение вязано-паяных медных проволочных сеток для молниезащиты углепластиков в самолётостроении // Технологические системы, 2012. – №1(58). – С. 29-33. http://technological-systems.com/images/journal/2012/files/ts58_29-33.pdf
- [2] Вишняков Л. Р. Вязано-паяные медные сетки и углеродные наноструктурные частицы для молниезащиты композиционных материалов: опыт авиастроения для ветроэнергетики // Технологические системы, 2013. – №2(63). – С. 22-28. <http://technological-systems.com/images/journal/2013/files/ts63.pdf>
- [3] Вишняков Л. Р. Вязано-паяные проволочные сетки для молниезащиты лопастей ветроэлектродгенераторов / Л. Р. Вишняков, О. В. Зубков, В. А. Коханый, И. Н. Коханая // Технологические системы, 2014. – №1(66). – С. 58-62. http://technological-systems.com/images/journal/2014/files/ts66_58-63.pdf
- [4] Вишняков Л. Р. Разрядные испытания имитированным током молнии композиционных материалов с молниезащитным покрытием на основе медных вязаных сеток / Л. Р. Вишняков, О. К. Недзельский, Ю. Ф. Гринь, И. И. Чернявский // Вісник інженерної академії України. – 2009. – №3-4. – С. 187-192.

Vishnyakov L. R.¹, Kokhanyy V. A.¹, Chernyavsky I. I.², Kokhana I. N.¹, Obodeeva I. N.¹

¹ Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of National Academy of Science of Ukraine. Ukraine, Kiev

² ANTONOV, State-owned Enterprise. Ukraine, Kiev

CALCULATION AND MEASUREMENT OF THE ELECTRICAL RESISTIVITY OF ANISOTROPIC MESHED LIGHTNING PROTECTION RODS (CURRENT REMOVALS) FOR SHEET CONSTRUCTIONS FROM CARBON FIBER REINFORCED PLASTICS

The calculation method and methodology for determination the average circular surface electrical resistance for lightning protection mesh coatings intended for the sheets of structural carbon fiber reinforced plastics composites had been proposed. These calculations and measurements allow optimizing the arrangement of mesh fabric relatively the position of the carbon fiber reinforced plastics. Furthermore it ensures the opportunity of non-destructive quality control for meshed fabrics on the base of decreasing of its anisotropy.

Keywords: lightning protection; meshed fabric, anisotropy; electrical resistivity; lightning protection rod, current removal rod.

References

- [1] Vishnjakov L. R. Razrabotka i vnedrenie vjazano-pajanyh mednyh provolochnyh setok dlja molniezashhity ugleplastikov v samoljotostroenii // Technological systems, 2012 – #1(58). – P. 29-33. (In Russian) http://technological-systems.com/images/journal/2012/files/ts58_29-33.pdf
- [1] Vishnyakov L. R. Knitted soldered copper meshes and carbon nanostructure particles for use in lightning protection of composite materials: experience in aircraft components construction expanded to wind power production industry // Technological systems, 2013 - #1(63). – P. 22-28. (In Russian) <http://technological-systems.com/images/journal/2013/files/ts63.pdf>
- [1] Vishnyakov L. R. Knitted soldered wire meshes for lightning protection of wind unit generator blades / L. R. Vishnyakov, O. V. Zubkov, V. O. Kokhaniy, I. M. Kokhana // Technological systems, 2014 – #1(66). – P. 58-62. (In Russian) http://technological-systems.com/images/journal/2014/files/ts66_58-63.pdf
- [1] Vishnjakov L. R. Razrjadnye ispytaniya imitirovannym tokom molnii kompozicionnyh materialov s molniezashhitym pokrytiem na osnove mednyh vjazanyh setok / L. R. Vishnjakov, O. K. Nedzel'skij, Ju. F. Grin', I. I. Chernjavskij // Visnik inzhenernoi akademii Ukraini. – 2009. – №3-4. – PP. 187-192. (In Russian).