



Д.В. Блеклов, аспирант «НИУ «МЭИ»
С.С. Ветлугаев, канд. техн. наук,
научный сотрудник ОАО «ВНИИКП»

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДЕФОРМАЦИИ ОТЛИВКИ ИЗ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКОЙ РЕЗИНЫ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КОНЦЕВЫХ И СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ МУФТАХ

Аннотация. Разработана методика оценки влияния деформации отливок, изготовленных из кремнийорганической резины элементов концевых и соединительных муфт на распределение напряженности электрического поля в муфтах.

Показано, что деформация таких отливок при используемой на практике методике монтажа на силовой кабель напряжением 220 кВ сечением 1600–2500 мм² не приводит к недопустимому изменению напряженности электрического поля.

Ключевые слова: соединительная муфта, концевая муфта, кабельная арматура надвижного типа, высоковольтные кабельные муфты, контактное давление, распределение электрического поля, расчетная область, выравнивающий электрод.

Abstract. The procedure for the assessment of the impact of silicone rubber moulding deformation on the electric stress distribution in terminations and joints was developed. It is shown that the deformation of such mouldings does not result in inadmissible change of the electric field stress when the 220 kV 1600–2500 mm² power cable is terminated and jointed using commonly applied in practice methods.

Key words: joint, termination, slide-on cable accessories, high-voltage cable terminations and joints, contact pressure, electric field distribution, computational domain, stress-relief electrode.

Материал поступил в редакцию 09.06.2016
Блеклов Д.В. E-mail: blecklov@hotmail.com

Ввод мощности для энергоснабжения крупных городов обеспечивается кабельными линиями высокого напряжения. В состав современной линии входят высоковольтный кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена и арматура.

Широкое распространение получили муфты надвижного типа, изоляция которых представляет собой предварительно изготовленные из кремнийорганических резин отливки, которые проходят приемо-сдаточные испытания в заводских условиях. Внутри такой отливки находятся элементы регулирования электрического поля – электроды, которые выполнены из электропроводящей резины. Во время монтажа муфты отливка надвигается на подготовленный кабель при помощи специального оборудования.

Расчет конструкции отливки и технологии ее производства являются наиболее важными и взаимосвязанными этапами проектирования высоковольтной кабельной арматуры надвижного типа. При этом безотказная работа таких муфт во многом определяется не столько электрической прочностью самой отливки, сколько прочностью границы раздела между отливкой и изоляцией кабеля. Известно, что электрическая прочность границы раздела двух сред зависит от величины контактного давления соприкасающихся поверхностей [1].

Упругие свойства резины позволяют устанавливать одну и ту же отливку из кремнийорганической резины на кабели различных сечений. Для определения диапазона применяемых сечений необходимо знать допустимые величины контактного давления, которые обеспечивают заданную электрическую прочность границы раздела (расчет приведен в [1]). Неизбежная деформация отливки после ее установки на кабель приводит к изменению формы электродов, регулирующих поле, и как следствие – к изменению градиентов потенциала; исследование данной задачи приведено в [2]. В настоящей статье приведена оригинальная методика по оценке влияния изменения формы электродов на распределение напряженности электрического поля в расчетных областях концевой и соединительной муфт. Так как напряженность в расчетных областях муфты является определяющей для электрической прочности конструкции муфты в целом [3], то оценка такого влияния представляется целесообразной и даже необходимой.

Изготовление отливок для концевых и соединительных муфт происходит в два этапа: сначала отливают из электропроводящей композиции элементы, регулирующие поле, после чего их размещают в прессформу и заполняют изоляционной

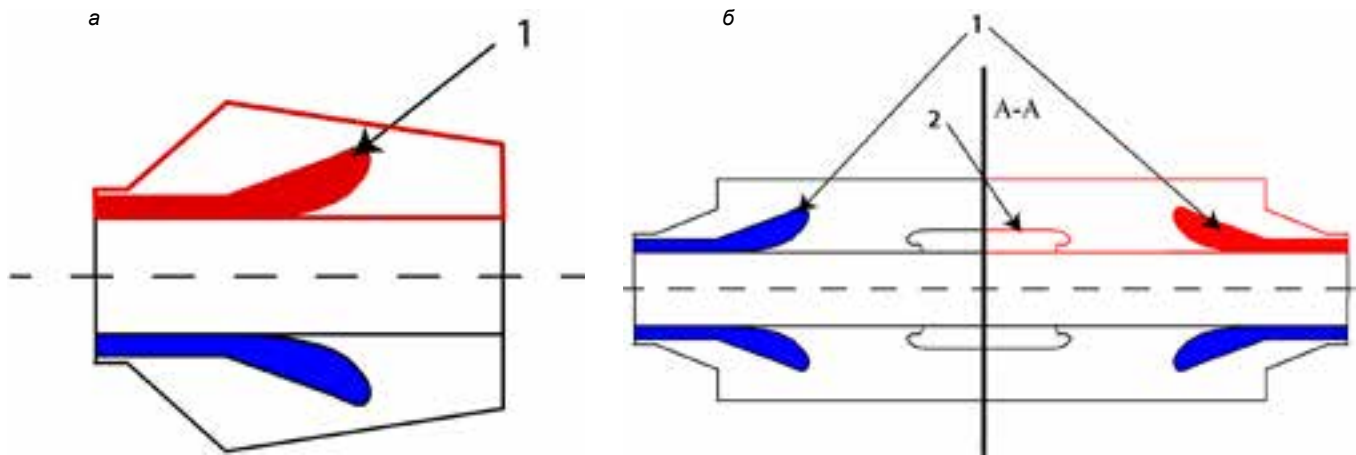


Рис. 1. Продольный разрез кремнийорганической отливки концевой (а) и соединительной (б) муфты (1 – выравнивающий электрод, 2 – центральный электрод)

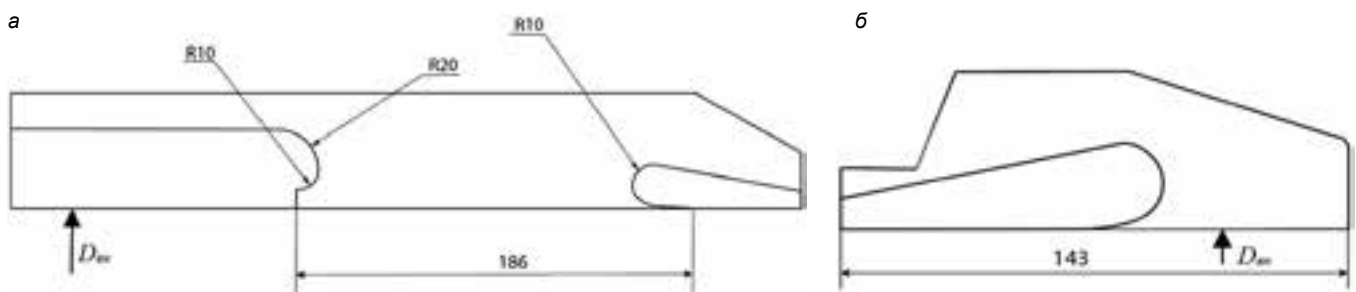


Рис. 2. Конструкционные размеры отливки соединительной (а) и концевой (б) муфты, размеры даны в мм

композицией. В качестве элементов, регулирующих поле в концевой муфте, используется выравнивающий электрод, а в соединительной – два симметрично (относительно плоскости А-А) расположенных выравнивающих электрода и один центральный электрод, экранирующий место соединения токопроводящих жил кабелей (рис. 1 а и б).

В качестве критерия отсутствия повреждений внутренней поверхности отливки большинство производителей кабельной арматуры установили максимальный коэффициент растяжения – $K_{р\max}$:

$$K_{р\max} = \frac{D_{\text{измакс}} - D_{\text{вн}}}{D_{\text{вн}}}, \quad (1)$$

где $D_{\text{измакс}}$ – максимальный диаметр по изоляции кабеля при установке на которую отсутствуют повреждения внутренней поверхности отливки;

$D_{\text{вн}}$ – диаметр внутренней отливки.

Так, производители муфт показали, что для резин типа LSR (применяемых при производстве отливок в 90 % случаев) $K_{р\max}$ равен 35 %. Типовые и предквалификационные испытания высоковольтной кабельной арматуры на соответствие требованиям стандартов МЭК проводят обычно на кабеле максимального сечения, например, 2500 мм² с последующим распространением результатов на более низкие сечения. В результате расчета определено минимальное сечение жилы кабеля, на которое может быть распространены результаты испытаний – 1600 мм². При этом сечении контактное давление на границе раздела «изоляция кабеля–кремнийорганическая отливка» является минимально допустимым по [1], а коэффициент растяжения будет равен $K_p = 10\%$.

Очевидно, что на распределение напряженности поля в изоляции муфт оказывает влияние форма электродов. Оценим, как изменится величина напряженности поля при деформации электродов после установки отливок с заданным диаметром $D_{\text{вн}}$ (рис. 2 а, б) на кабели с сечением токопроводящих жил 1600 мм² и 2500 мм².

Определение деформации отливки при различных коэффициентах растяжения рационально свести к решению задачи Ламе, то есть к задаче определения напряжений и перемещений в толстостенных полых цилиндрах. Разделим

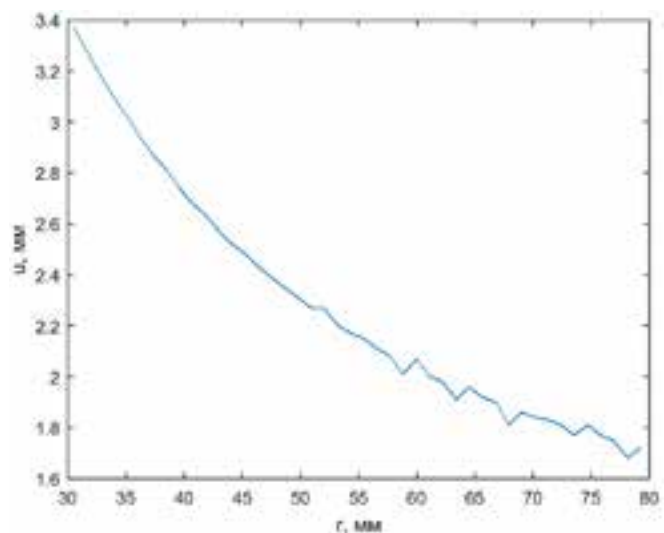


Рис. 3. Зависимость перемещения u от текущей координаты r для полого цилиндра

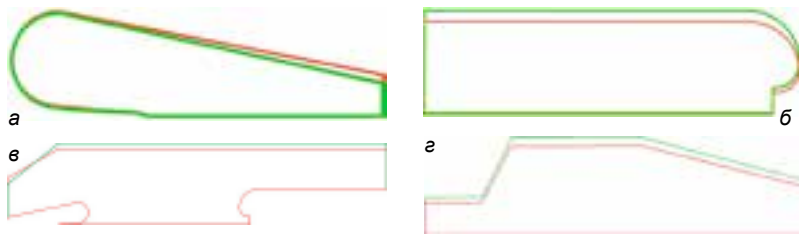


Рис. 4. Деформация выравнивающего (а) и центрального (б) электрода, а также изоляции кремнийорганической отливки соединительной (в) и концевой муфты (г); красным цветом выделено изменение формы

конструкцию кремнийорганической отливки на полые цилиндры толщиной dx с внутренними и наружными радиусами $R_{в}$ и $R_{н}$ соответственно. Для каждого полого цилиндра по методике, изложенной в [1], определим зависимость перемещения от радиуса. Такая зависимость для цилиндра с внутренним и внешним радиусом 30 мм и 80 мм соответственно представлена на рис. 3.

Данную зависимость (рис. 3) можно аппроксимировать выражением:

$$u(r) = \frac{A}{r}, \quad (2)$$

где A – постоянная;
 r – радиальная координата по радиусу.

Постоянная A зависит от внутреннего и внешнего диаметра полого цилиндра, внутреннего давления, коэффициентов потенциала Муни C_1, C_2 . Определив значение A методом наименьших квадратов, можно рассчитать деформацию для каждой точки отливки, используя выражение (1).

На основании этих соображений определена деформация выравнивающего и центрального электродов, а также изоляции кремнийорганической отливки соединительной и концевой муфты. Деформированные и исходные конструкции электродов и отливок показаны на рис. 4 а–г.

Расчет напряженности электрического поля для расчетных областей, показанных на рис. 5, 6, производился в соответствии с методиками, изложенными в [4, 5]. Распределение



Рис. 5. Расчетная область изоляции и электродов соединительной муфты. (1 – граница раздела «кремнийорганическая отливка–изоляция кабеля»)



Рис. 6. Расчетная область изоляции и электродов концевой муфты (1 – граница раздела «кремнийорганическая отливка–масляный канал»)

тангенциальной составляющей напряженности электрического поля вдоль границы раздела «кремнийорганическая отливка–изоляция кабеля» отливки соединительной муфты (рис. 5, поз. 1) и вдоль границы раздела «кремнийорганическая отливка–масляный канал» отливки концевой муфты (рис. 6, поз. 1) для отливок, установленных с K_p , равным 10 и 35 %, приведено на рис. 7 и 8, соответственно.

На кривых распределения напряженности (рис. 7 и 8) отмечаются максимумы, которым соответствуют проекции точек А и Б центрального и выравнивающего электродов на продольную ось муфты. При деформации электродов, показанной на рис. 4 а, б, положение этих точек смещается к внутреннему диаметру отливки, это соответствует уменьшению радиуса закругления электродов. Вследствие этого увеличивается напряженность электрического поля в этих точках.

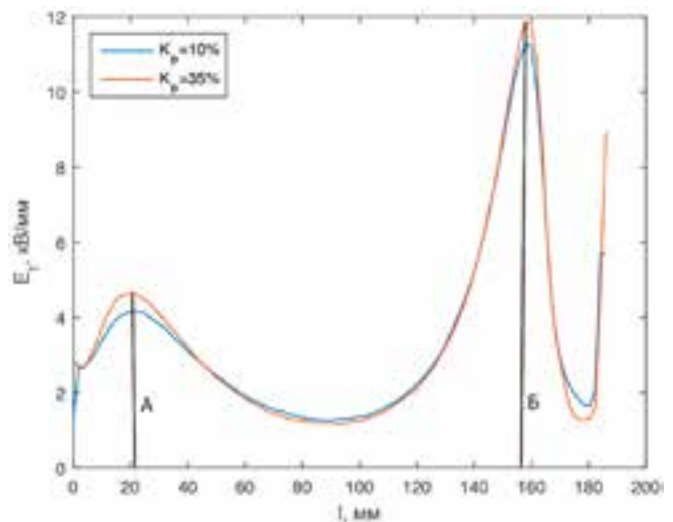


Рис. 7. Распределение тангенциальной напряженности электрического поля по границе раздела «кремнийорганическая отливка–изоляция кабеля» при различных коэффициентах растяжения отливки соединительной муфты

Расчеты показывают, что напряженность электрического поля в этих точках для отливки соединительной муфты, установленной на кабель сечением 2500 мм², увеличилась не более, чем на 5 % по сравнению с отливкой, установленной на кабель сечением 1600 мм². Известно, что стандартами [6, 7] предусматривается возможность увеличения напряженности в изоляции кабеля на 10 % из-за допусков на геометрические размеры кабеля.

Напряженность электрического поля в точке А на отливке концевой муфты, установленной на кабель сечением 2500 мм², увеличилась не более, чем на 17 % по сравнению с напряженностью в отливке, установленной на кабель сечением 1600 мм, и составила $E_{\max} = 0,8$ кВ/мм. Это значение не превышает принятое в [8] допустимое значение напряженности поля в масляном канале концевой муфты, равное 1 кВ/мм.

По результатам исследования, можно сделать вывод, что деформация отливок

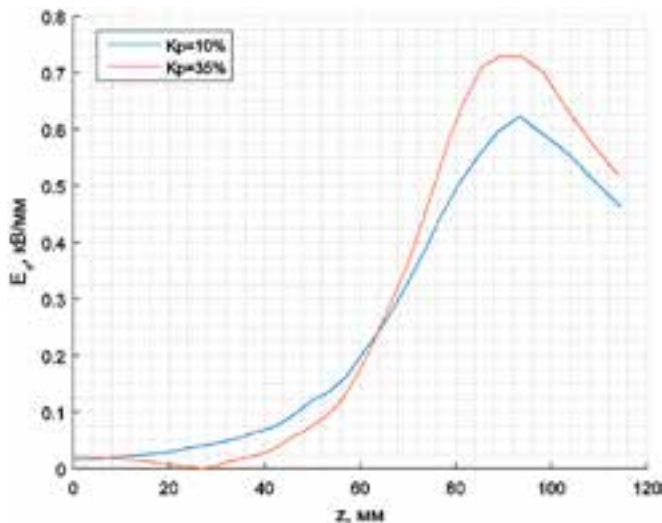


Рис. 8. Распределение тангенциальной составляющей напряженности электрического поля по границе раздела «кремнийорганическая отливка–масляный канал» для различных коэффициентов растяжения отливки концевой муфты

изготовленных из кремнийорганической резины элементов концевых и соединительных муфт при их монтаже на силовую кабель напряжением 220 кВ сечением 1600–2500 мм² не приводит к недопустимому изменению напряженности электрического поля в муфтах и может не учитываться при их конструировании.

Авторы выражают признательность д-ру техн. наук Михаилу Юрьевичу Шувалову за ряд ценных замечаний, сделанных при подготовке данной статьи, а также [1].

ЛИТЕРАТУРА

1. Блеклов Д.В., Николаева М.А. Некоторые особенности расчета конструкции кремнийорганических отливок для концевых и соединительных муфт для кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 110–220 кВ // Кабели и провода. 2016. – № 3. – С. 21–24.
2. Stefan Zierhut, Dr. Thomas Klein, Dr. Eckhard Wendt, Lutz Zühlke. Influence of expansion on electric field distribution of stress cones for high voltage cable accessories // JICABLE 2015, E7.2. – P. 1–6.
3. Ветлугаев С.С. Исследование, разработка и усовершенствование конструкций переходных соединительных муфт для кабелей на напряжение 110–220 кВ: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2015. – 112 с.
4. Ветлугаев С.С., Макаров Л.Е., Образцов Ю.В., Фурсов П.В. Электрическое поле в соединительных муфтах с эластомерной изоляцией на напряжение 110 кВ // Кабели и провода. – 2004. – № 1. – С. 15–18.
5. С.С. Ветлугаев. Выбор допустимых напряженностей и электрический расчет переходной муфты // Кабели и провода. – 2009. – № 3. – С. 16–20.
6. Стандарт МЭК 60840. Испытание силовых кабелей с экструдированной изоляцией на рабочее напряжение выше 30 кВ (U_m = 26 кВ) до 150 кВ (U_m = 170 кВ).
7. Стандарт МЭК 62067. Силовые кабели с экструдированной изоляцией и арматура на рабочее напряжение выше 150 кВ (U_m = 170 кВ) до 500 кВ (U_m = 550 кВ).
8. Вага Н.А. Методика автоматизированного проектирования концевых муфт кабелей с пластмассовой изоляцией: дис. ... канд. техн. наук. – М., 1993. – 148 с.



САМАРСКАЯ КАБЕЛЬНАЯ КОМПАНИЯ

SAMARA CABLE COMPANY

- кабели сигнально–блокировочные, в т.ч. с водоблокирующими материалами, в оболочке из поливинилхлоридного пластика пониженной пожароопасности и из полимерной композиции, не содержащей галогенов;
- кабели магистральной зоновой и местной связи;
- силовые и контрольные кабели, в т.ч. не распространяющие горение, огнестойкие, для районов с холодным климатом, в оболочке из полимерной композиции, не содержащей галогенов;
- огнестойкие кабели для противопожарных систем и систем оповещения с изоляцией из кремнийорганической резины;
- провода самонесущие изолированные и защищенные для воздушных линий электропередачи, в т.ч. не распространяющие горение;
- провода с поливинилхлоридной изоляцией для электрических установок;
- городские телефонные кабели;
- кабели телефонные для цифровых сетей;
- автомобильные провода.

Система менеджмента качества сертифицирована на соответствие требованиям ГОСТ (МС) ISO 9001–2011, ISO/TS 16949:2009 (для потребителей автопроводов), ГОСТ РВ 0015–002–2012 (для потребителей продукции специального назначения). Система экологического менеджмента сертифицирована на соответствие требованиям ГОСТ Р ИСО 14001–2007.

АО «Самарская Кабельная Компания»
443022, г. Самара, ул. Кабельная, 9
Тел./факс (846) 279 1210, 278 4146, 276 9899
E-mail: sales@samaracable.ru
www.samaracable.ru