

Надежность и долговечность полимерных изоляторов контактной сети

А. М. ЛУКЬЯНОВ¹, Ю. Г. ЧЕПЕЛЕВ², А. А. ЛУКЬЯНОВА¹

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГБОУ ВО РУТ (МИИТ), Москва, 127994, Россия

² Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), Москва, 129626, Россия

Аннотация. В статье описан способ расчета осесимметричных клееобжимных соединений полимерных изоляторов на основе метода конечных элементов. Проанализировано напряженное состояние зоны стыка «стеклопластиковый стержень — оконцеватель».

Определены оптимальные размеры клееобжимного соединения изолятора с учетом вязкоупругих свойств клея. Приведены результаты испытаний макетов полимерных изоляторов контактной сети в интервале изменения температур $-60...+120\text{ }^{\circ}\text{C}$. Дана оценка долговечности натяжных (подвесных), фиксаторных и консольных полимерных изоляторов на основе принципа температурно-временной аналогии.

Ключевые слова: контактная сеть; полимерные изоляторы; осесимметричные клееобжимные соединения; надежность; долговечность; конечно-элементная модель

Введение. На сети электрифицированных дорог и линиях электропередачи передовых стран идет интенсивная работа по переоборудованию традиционных изоляционных конструкций, выполненных из фарфора и стекла, на новые — полимерные. Преимущества полимерных конструкций перед традиционными наиболее полно отражены в [1, 2, 3, 4, 5]. Там же указывается, что основной причиной отказов полимерных изоляторов является нарушение прочности соединения «стеклопластиковый стержень — оконцеватель».

Чтобы свести к минимуму механические повреждения необходимо, прежде всего, исследовать напряженно-деформированное состояние в зоне соединения «стеклопластиковый стержень — окон-

цеватель», а на основе полученных результатов разработать ряд конструктивных решений, позволяющих обеспечить требуемую надежность такого соединения.

Предположим, что полимерный изолятор в зоне соединения элементов работает только на растяжение (сжатие) и нормальные напряжения в них равномерно распределены по площади поперечного сечения, а клеевая прослойка работает только на сдвиг и касательные напряжения равномерно распределены по ее толщине.

Благодаря своей простоте эта модель позволяет получить в замкнутом виде распределение указанных напряжений в пределах соединения, но с ее помощью нельзя определить другие компоненты тензора напряжений, которые оказывают влияние на прочность соединения.

Известны попытки уточнить модель, например путем учета изгиба соединяемых элементов (втулок при соединении трубчатых элементов и т. д.) [6]. Трудности решения задачи на основе таких моделей увеличиваются, а надежность полученных решений часто представляется весьма сомнительной.

С этой точки зрения, по-видимому, более эффективной может оказаться конечно-элементная модель клеевого соединения.

Рассмотрим упругое соединение «стеклопластиковый стержень — оконцеватель» полимерного изолятора (рис. 1), где текущий r — радиус соединения, все размеры даны в сантиметрах, и сопоставим результаты расчета указанной модели соединения.

В зоне соединения в оконцевателе 2 сделана выточка цилиндрической формы, соосная со стержнем 1. Ось x совпадает с осью соединяемых элементов.

Для расчета все соединение представляется в виде совокупности 1697 кольцевых конечных элементов поперечного сечения, из которых 580 принадлежат стержню, 718 — металлическому оконцевателю, 399 — клеевому слою.

Механические характеристики соединения следующие:

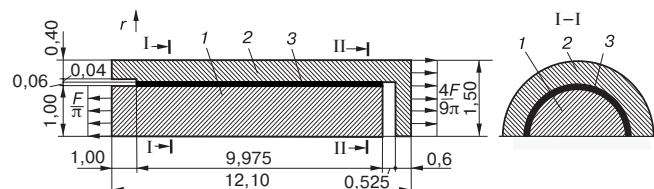


Рис. 1. Расчетная схема осесимметричного клеевого соединения:
1 — стеклопластиковый стержень; 2 — металлический оконцеватель; 3 — клеевой слой; r — радиус соединения

Fig. 1. Calculation scheme of an axis-symmetric glue joint:
1 — fiberglass rod; 2 — metal end terminal; 3 — glue layer;
 r — radius of the connection

■ E-mail: Chepelev.yuri@vniizht.ru (Ю. Г. Чепелев)

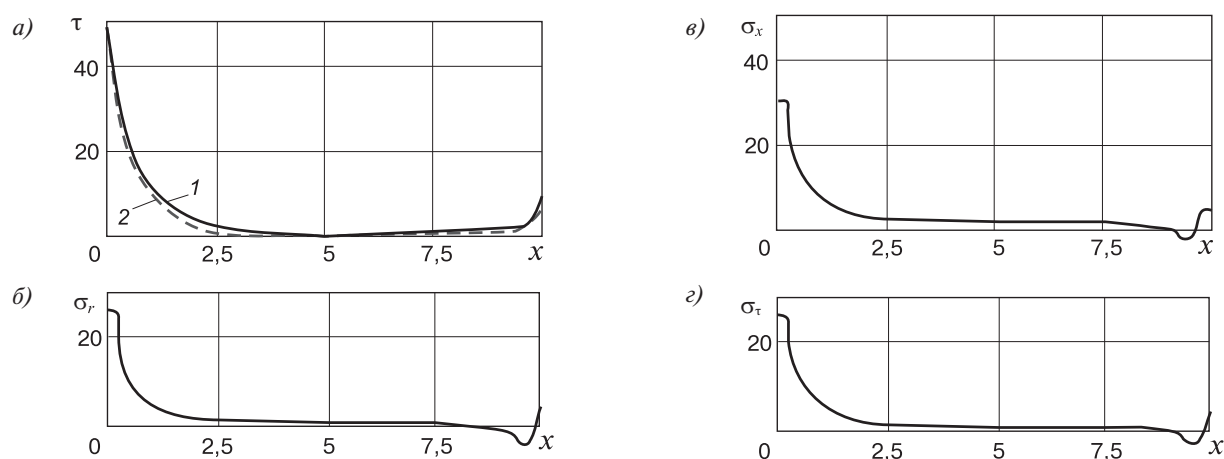


Рис. 2. Изменение напряжений в середине клеевого слоя вдоль соединения:

a — касательные напряжения: 1 — при использовании конечно-элементной модели; 2 — при использовании осесимметричной модели; *б* — радиальные напряжения; *в* — нормальные напряжения; *г* — нормальные тангенциальные напряжения

Fig. 2. Change of stresses in the middle of the glue layer along the joint:

a — tangential stresses: 1 — when using the finite element model; 2 — when using an axis-symmetric model; *б* — radial stresses; *в* — normal stresses; *г* — normal tangential stresses

• для металла: модуль упругости $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$;

• для клея: $E = 5 \cdot 10^3$ МПа, $\mu = 0,47$;

• для стеклопластика (он считается изотропным материалом): $E = 2,1 \cdot 10^4$ МПа, $\mu = 0,25$. Нагрузка на клеевое соединение P равна 20 кН.

Результаты расчета графически иллюстрируются на рис. 2, где показано изменение вдоль соединения действующих в середине клеевой прослойки касательных напряжений τ (кривая 1, рис. 2, *a*), радиальных напряжений σ_r (рис. 2, *б*), нормальных напряжений σ_x (рис. 2, *в*) и нормальных тангенциальных напряжений σ_τ , последние направлены перпендикулярно плоскости чертежа — вдоль касательной к окружности, проходящей через рассматриваемую точку поперечного сечения (рис. 2, *г*).

Отсюда видно, что касательные напряжения при $x = 0$ и $x = l$ равны нулю, а при $x \approx 0$ ($x > 0$) и $x \approx l$ ($x < l$) они имеют резкий всплеск, в результате чего их распределение оказывается близким к тому, какое было показано на рис. 2, *a* (кривая 2), l — длина клеевого слоя.

Сопоставляя графики зависимостей, приведенных на рис. 2, между собой, можно заметить, что характер изменения всех напряжений в области наибольших значений оказывается подобным распределению касательных напряжений.

На рис. 3 показаны эпюры тех же напряжений в поперечных сечениях I—I (рис. 3, *a*) и II—II (рис. 3, *б*), каждое из которых находится на расстоянии 0,1875 см соответственно от левого и правого концов клеевого слоя. Эти эпюры свидетельствуют о том, что касательные напряжения можно считать практически постоянными по толщине клеевого слоя. Следует

обратить внимание на то, что на левом конце соединения в клее наряду с большими касательными напряжениями действуют такого же порядка нормальные растягивающие напряжения, которые ухудшают условия работы материала клея, способствуя отрыву металлического оконцевателя от стеклопластикового стержня.

Можно ожидать, что в качественном отношении, такие же результаты будут получены и тогда, когда материал стеклопластикового стержня будет обладать упруго-ортотропными свойствами.

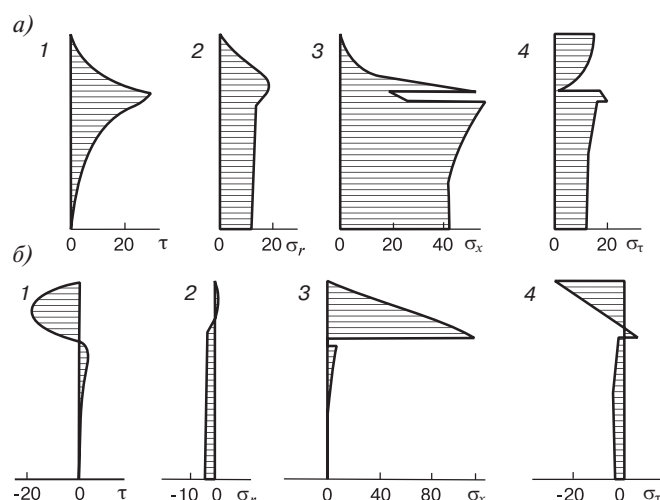


Рис. 3. Эпюры напряжений в сечениях I—I (*a*) и II—II (*б*) клеевого соединения: 1 — касательные напряжения; 2 — радиальные напряжения; 3 — нормальные напряжения; 4 — нормальные тангенциальные напряжения

Fig. 3. Stress diagrams in sections I—I (*a*) and II—II (*б*) of the glue joint: 1 — tangential stresses; 2 — radial stresses; 3 — normal stresses; 4 — normal tangential stresses

Допустим, что в процессе изготовления полимерного изолирующего элемента внутренний диаметр металлического оконцевателя на 0,1 см больше диаметра стеклопластикового стержня. Если же производится обжатие оконцевателя, то толщина клеевого слоя h уменьшается и будет равной 0,05 см. Учитывая это и прочие заданные значения параметров, легко вычислить максимальное касательное напряжение в клеевом слое (при $x = l$, если $\alpha > 1$).

Предположим, что $h = 0,01$ см. Тогда указанное касательное напряжение оказывается в $\sqrt{5}$ раз больше того, которое имело место в первом случае (при $h = 0,05$ см). Это говорит о том, что в клееобжимном соединении касательные напряжения могут оказаться значительно больше предела прочности материала клея при сдвиге τ_b и, следовательно, вызвать по крайней мере частичное разрушение клея.

Наибольший интерес вызывает анализ напряженно-деформированного состояния и прочности соединения стеклопластикового стержня с оконцевателем с учетом вязкоупругих свойств клея (ползучести клея) [6]. Такой анализ позволяет не только оценить напряженно-деформированное состояние клеевого соединения в любой момент времени, но и определить оптимальные параметры оконцевателей с учетом времени действия нагрузки на изолятор. Аналитическое решение такой задачи сопряжено с большими трудностями, которые, однако, можно преодолеть, используя современные численные методы и ЭВМ.

Учет вязкоупругости клеевого слоя. На начальном этапе решения поставленной задачи ограничимся рассмотрением вязкоупругих свойств клеевого слоя. Деформацию сдвига γ в клеевом слое полимерного изолятора при ползучести и постоянных напряжениях можно выразить через функцию $C(t - \xi)$, называемую мерой ползучести. В случае переменных во времени напряжений деформация γ к моменту времени t может быть найдена из соотношения

$$\gamma(t) = \tau(t)/G + \int_0^t (\tau(\xi)/G) K(t - \xi) d\xi, \quad (1)$$

где $\tau(t)$ — касательные напряжения в клеевом слое; G — модуль сдвига (const); t — текущее время наблюдения; t_0 — начало нагружения; ξ — текущее время наблюдения (переменная интегрирования); $K(t - \xi)$ — функция наследственности, или ядро ползучести; d — диаметр стеклопластикового стержня.

Рассмотрим ядро ползучести, представленное функцией

$$K = aK_0 \exp[-a(t - \xi)], \quad (2)$$

где a , K_0 — константы ядра ползучести клеевого слоя.

Используя расчетную модель клеевого соединения (см. рис. 4, 5), определим деформацию сдвига в клеевом слое в момент времени t с учетом (2) и получим:

$$\begin{aligned} d\gamma(t, x)/dx &= h(E_1 F_1 E_2 F_2) / \pi d(E_1 F_1 + E_2 F_2) \times \\ &\times \left\{ d^3 \gamma(t, x) / G dx^3 + \int_0^t (a K_0 \exp[-(t - \xi)]) \times \right. \\ &\times d^3 \gamma \xi(\xi, x) / dx^3 \} d\xi, \end{aligned} \quad (3)$$

где E_1 , E_2 — модули упругости стеклопластикового стержня и оконцевателя соответственно; F_1 , F_2 — площади поперечного сечения этих же элементов.

По всей длине клеевой прослойки должно соблюдаться условие:

$$P = N_1(x, t) + N_2(x, t),$$

где P — нагрузка, действующая на изолятор; N_1 , N_2 — нормальные силы, действующие в стеклопластиковом стержне и оконцевателе соответственно.

Нормальную силу N_1 определим по формуле

$$\begin{aligned} d^2 N_1(x, t) / \pi d G dx^2 + 1 / \pi d \int_0^t (a K_0 \exp \times \\ \times [-a(t - \xi)] d^2 N_1) / dx^2 d\xi - [(E_1 F_1 + E_2 F_2) / \\ / h(E_1 F_1 E_2 F_2)] N_1(x, t) = P / h E_2 F_2. \end{aligned} \quad (4)$$

Подставляем усилие N_1 в формулу (4) в виде $N_1(x, t) = P / 2 + Px / l + Z(x, t)$, где функция $Z(x, t)$ должна удовлетворять условиям: $Z(t) = 0$ при $x = -l / 2$ и $x = l / 2$.

Для решения (4) используем метод Фурье. Функцию $Z(x, t)$ будем искать в виде произведения двух функций $X(x)$ и $T(t)$, из которых первая зависит только от длины соединения x , а вторая только от времени t :

$$Z(x, t) = X(x)T(t).$$

С учетом граничных условий, накладываемых на функцию $Z(x, t)$, можно принять:

$$\begin{aligned} Z(x, t) &= \sum_{k=1} T_k(t) X_k(x) = \\ &= \sum_{k=1} T_k(t) \sin \pi k / l (x + l / 2). \end{aligned} \quad (5)$$

Подставляя (5) в уравнение (4), предварительно разложив его правую часть в ряд (Фурье) по собственным функциям $X_2(x)$, приравнявая соответствующие коэффициенты при синусах, получим:

$$\begin{aligned} ((\pi^2 k^2) / G l^2) T_k(t) + ((\pi^2 k^2) / l^2) a K_0 \times \\ \times \int_0^t \exp[-a(t - \xi)] T_k(\xi) d\xi + ((\pi d(E_1 F_1 + E_2 F_2)) / \\ / h(E_1 F_1 E_2 F_2) T_k(t)) = (2d(E_1 F_1 + E_2 F_2) P) / \\ / (h(E_1 F_1 E_2 F_2) l) [(-1)^k - 1] E_1 F_1 / (E_1 F_1 + \\ + E_2 F_2) - (-1)^k]. \end{aligned} \quad (6)$$

Для решения (6) относительно T_k воспользуемся преобразованием Лапласа. После некоторых выкладок получим выражение, определяющее изменения касательных напряжений во времени по длине клеевой прослойки

$$\tau(t, x) = (-P / \pi d l) + \sum_{k=1} C_k \left[(1 / b_k - 1) \times \right. \\ \left. \times \exp(-b_k t a) - 1 / b_k \right] \cos(\pi k / l)(x + l / 2), \text{ где} \quad (7)$$

$$b_k = \pi K^2 K_0 \left((\pi K^2 / G) + l^2 d (E_1 F_1 + E_2 F_2) / \right. \\ \left. / h (E_1 F_1 E_2 F_2) \right)^{-1} + 1;$$

$$C_k = (2P(E_1 F_1 + E_2 F_2) / h (E_1 F_1 E_2 F_2)) \left[((-1)^k - 1) / \right. \\ \left. / ((E_1 F_1 / E_2 F_2) + 1) - (-1)^k \right] \left((\pi^2 K^2 / l^2 G) + \right. \\ \left. + \pi d (E_1 F_1 + E_2 F_2) / h (E_1 F_1 E_2 F_2) \right)^{-1}.$$

В работе [7] показано, что наиболее характерными являются три сечения клеевой прослойки: I–I — на входе стеклопластикового стержня в оконцеватель; II–II — на конце стержня; III–III — в средней части клеевого соединения.

Для расчета примем, что клеевое соединение выполнено из однонаправленного стеклопластикового стержня круглого сечения диаметром 2 см с характеристиками, указанными выше (при расчете соединения методом конечных элементов). Константы ядра ползучести клеевого слоя: $a = 0,0636$ 1/сут; $K = 1,23$ (МПа)⁻¹, сут; модуль сдвига $G = 1700$ МПа. Нагрузка, действующая на клеевое соединение та же, что и была ранее, а именно 20 кН.

На начальном этапе исследований оценим влияние толщины клеевой прослойки на напряженно-деформированное состояние клеевого соединения. Длина клеевого слоя была принята постоянной и равной 10 см, площадь поперечного сечения оконцевателя постоянна и равна 3,926 см², что соответствует наружному диаметру оконцевателя (3 см). Толщина клеевой прослойки принималась в границах 0,045–0,75 см. Зависимости τ от h для $t = 0$ и для $t = 1100$ сут приведены на рис. 6, а, б. Как видно из рисунков, увеличение толщины клеевой прослойки приводит к разгрузке торцовых сечений I–I и II–II, в сечении III–III (расположенном посередине клеевой прослойки) — к незначительному увеличению касательных напряжений. С увеличением времени действия нагрузки на клеевое соединение распределение касательных напряжений стремится к равномерному с величиной $\tau = P / \pi d l$.

Влияние толщины стенки оконцевателя δ на распределение τ оценивали, принимая постоянными длину клеевого соединения 10 см и толщину клеевой прослойки 0,06 см. Толщина стенки оконцевателя изменялась в пределах от 5 до 15 мм, что соответствовало

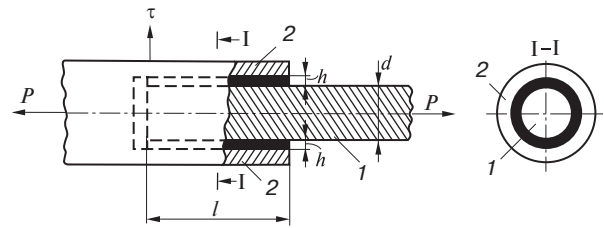


Рис. 4. Расчетная схема клеевого соединения:
1 — стеклопластиковый стержень; 2 — оконцеватель; P — нагрузка, действующая на изолятор; h — толщина клеевого слоя; d — диаметр стеклопластикового стержня; l — длина клеевого слоя; τ — касательные напряжения

Fig. 4. Calculation scheme of glued joint:
1 — fiberglass rod; 2 — end terminal; P — load acting on the insulator; h — thickness of the glue layer; d — diameter of fiberglass rod; l — length of the glue layer; τ — tangential stresses

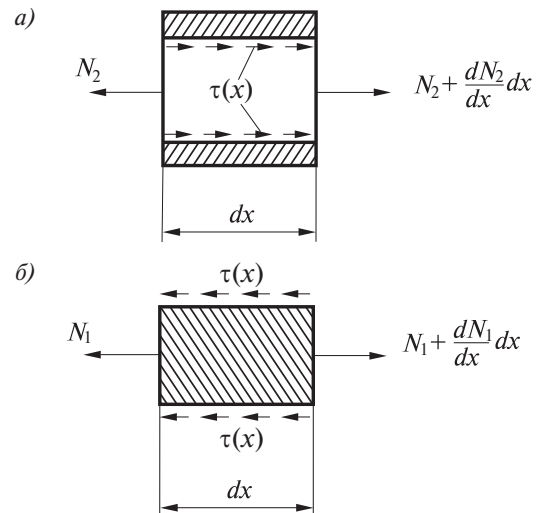


Рис. 5. Усилия, действующие на каждый элемент клеевого соединения: а — на металлическую трубку; б — на стеклопластиковый стержень; $\tau(x)$ — касательные напряжения в клеевом соединении; N_1 — усилия в стеклопластиковом стержне; N_2 — усилия в оконцевателе

Fig. 5. Forces acting on each element of the glue joint:
а — on the metal tube; б — on the fiberglass rod; $\tau(x)$ — tangential stresses in the glue joint; N_1 — forces in a fiberglass rod; N_2 — forces in the end terminal

площади поперечного сечения 3,9–9,4 см². Характер изменения касательных напряжений в трех сечениях при $t = 0$ и $t = 1100$ сут показан на рис. 6 (кривая 2).

Анализируя полученные зависимости (рис. 6, а, б), отметим, что влияние жесткости металлического оконцевателя на напряженное состояние клеевого соединения проявляется в незначительном изменении значений касательных напряжений при уменьшении величины δ . Такой же эффект наблюдается при утолщении клеевой прослойки. Таким образом, можно отметить, что увеличение стенки оконцевателя существенно не сказывается на характере распределения напряжений, а увеличение размеров оконцевателя приведет к неоправданному возрастанию массы клеевой конструкции.

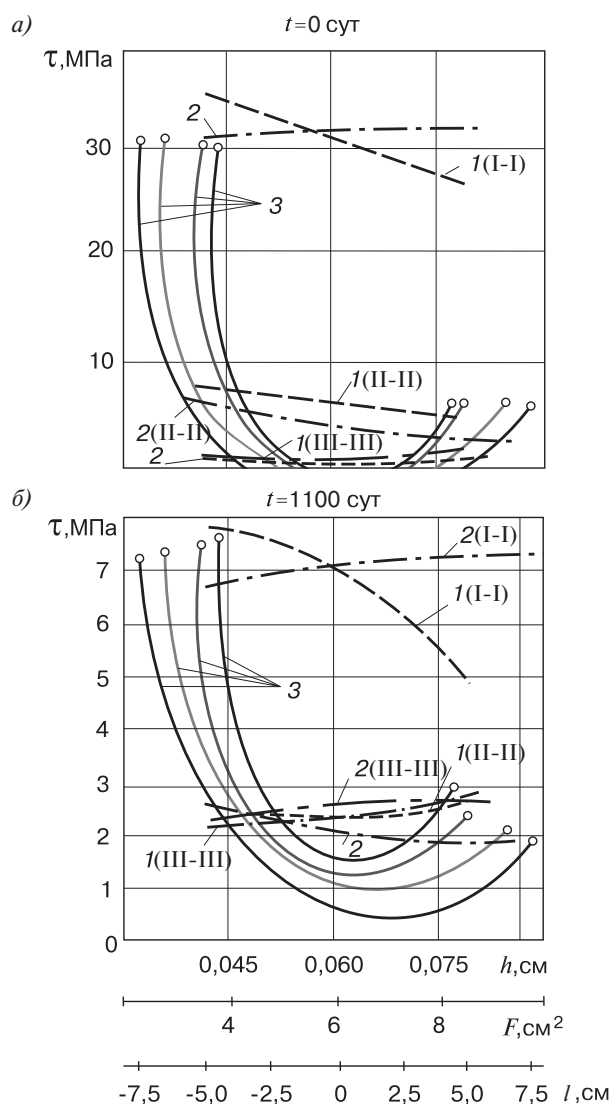


Рис. 6. Изменение касательных напряжений τ в клеевом соединении от толщины клеевой прослойки h (1), от площади поперечного сечения оконцевателя (2) и от длины клеевой прослойки l (3): а — при $t = 0$; б — при $t = 1100$ сут

Fig. 6. Change of tangential stresses τ in the glue joint from the thickness of the glue layer h (1), from the cross-sectional area of the end terminal (2) and from the length of the glue layer l (3): а — for $t = 0$; б — at $t = 1100$ days

При оценке влияния длины клеевой прослойки на ее напряженно-деформированное состояние были приняты постоянными толщина клеевой прослойки $h = 0,06$ см, толщина стенки оконцевателя $\delta = 0,5$ см.

Распределение касательных напряжений определялось при длинах клеевой прослойки 9–15 см (рис. 6, б, кривая 3). Анализ полученных зависимостей показывает, что увеличение длины клеевой прослойки приводит к незначительному разгрузению его торцовых сечений. Величина разгрузки не превышает 1%.

Характер распределения касательных напряжений по длине клеевого соединения позволяет оценить «мертвую зону», т. е. ту зону соединения, в

которой значения напряжений не превышают 5 % от максимальных. Анализируя результаты расчетов, отметим, что увеличение длины клеевой прослойки приводит к расширению «мертвой зоны». Знание напряженно-деформированного состояния клеевого соединения, зависящего от основных его конструктивных параметров, позволяет более обоснованно подойти к выбору критериев оптимизации конструктивных характеристик.

Предлагаемая методика оценки напряженно-деформированного состояния клеевого соединения полимерных изоляторов с учетом вязкоупругих свойств клея позволяет определить оптимальные параметры оконцевателей, принимая во внимание время действия нагрузки на изолятор.

Чтобы прогнозировать долговечность полимерных изоляторов исходя из условий механической прочности, необходимо располагать данными об изменении во времени длительного сопротивления составляющих узлов и материалов, из которых изготовлены изоляторы. Эти данные могут быть получены традиционными методами — постановкой массовых экспериментов по определению прочности в условиях, имитирующих воздействие реальных эксплуатационных факторов. Однако такие методы, хотя и приводят к получению наиболее достоверных результатов, все же экономически не эффективны и практически труднореализуемы. Задача облегчается, если использовать экспресс-методы определения деформативных и прочностных характеристик, позволяющие на основе ускоренных испытаний прогнозировать длительные характеристики на период эксплуатации изоляторов. Одним из таких экспресс-методов является метод *температурно-временной аналогии* (ТВА).

Метод ТВА. Данный метод был использован в работе [8] для прогнозирования долговечности образцов клееобжимного соединения, состоящего из кольца длиной 10 мм и стеклопластикового стержня диаметром 20 мм.

Оценка долговечности полимерных натяжных (подвесных), фиксаторных и консольных изоляторов осуществлялась на натурных макетах, т. е. образцах без защитного кремнийорганического покрытия стеклопластикового стержня. Натурные макеты натяжных изоляторов были изготовлены на эпоксидном связующем из стеклопластикового стержня диаметром 20 мм и длиной 225 мм. По концам стержня устанавливались стальные оконцеватели. Технология изготовления соединения «стеклопластиковый стержень — оконцеватель» в макетах была такой же, как для серийно выпускаемых изоляторов. Оконцеватели обжимались в шестигранной матрице, длина зоны обжатия — 50 мм.

В макетах фиксаторных изоляторов были применены типовые стальные оконцеватели, посаженные на стеклопластиковый стержень диаметром 38 мм и

длиной 300 мм. Оконцеватели опрессовывались в два этапа в шестигранной матрице усилием 1300 кН. Вторым этапом, отличавшимся от первого тем, что оконцеватель поворачивали в матрице на 30°.

В макетах консольных изоляторов был использован стеклопластиковый стержень диаметром 48 мм и длиной 300 мм. Посадка стеклопластикового стержня в оконцеватель осуществлялась на глубину 60 мм с повторением всех технологических режимов, применяемых в изготовлении серийных консольных изоляторов. У серийно изготовленных консольных изоляторов соединение стеклопластикового стержня с оконцевателем осуществлено клиновой заделкой.

Исследованиями, проведенными в ФГБОУ ВО РУТ (МИИТ), на растяжение консольных и опорных изоляторов с такими оконцевателями было установлено, что разрушение изоляторов происходит по материалу оконцевателя. Для изготовления массовых партий оконцевателей используется ковкий чугун. Поскольку ставилась задача определить прочность соединения «стеклопластиковый стержень — оконцеватель», для испытаний изготовили образцы с оконцевателями из стали, сохранив конструктивные решения клинового типа внутренней полости.

Многочисленным длительным испытаниям макетов полимерных изоляторов в широком диапазоне изменения нагрузки и температуры предшествовали экспериментальные исследования кратковременной прочности соединения «стеклопластиковый стержень — оконцеватель». Такие испытания были проведены в диапазоне изменения температур от –60 до +120 °С. Опыты на растяжение образцов в диапазоне указанных температур были выполнены на универсальной испытательной машине с фиксацией нагрузки и деформации. По диаграммам нагрузка/деформация определяли предельную разрушающую нагрузку R_p , соответствующую достижению максимальной деформации, т. е. такой деформации, которая определяется по гипотезам, лежащим в основе теории сопротивления материалов (иными словами, не учитываются проскальзывания обжатого оконцевателя по стеклопластиковому стержню).

По статистически обработанным результатам испытаний на рис. 7 показан характер изменения средних значений предельных разрушающих нагрузок. Из полученных зависимостей видно, что прочность клееобжимного соединения натяжных и фиксаторных изоляторов с увеличением температуры изменяется не столь значительно, как у клинового, используемого в консольных и опорных изоляторах. Проведенные испытания и их результаты позволили определить уровень нагружений изоляторов для выполнения длительных испытаний, который составлял $R = (0,8 \div 0,5) R_p$ кратковременных предельных нагрузок, взятых для соответствующих температур. Исследования выполнены при четырех значе-

ниях температуры: 20, 55, 75 и 120 °С. Долговечность в зависимости от выбранных условий опыта (нагрузка и температура) изменялась от нескольких минут до тысяч часов. Наибольшая продолжительность опыта составляла 3720 ч. При каждом уровне нагружений испытывали не менее четырех образцов.

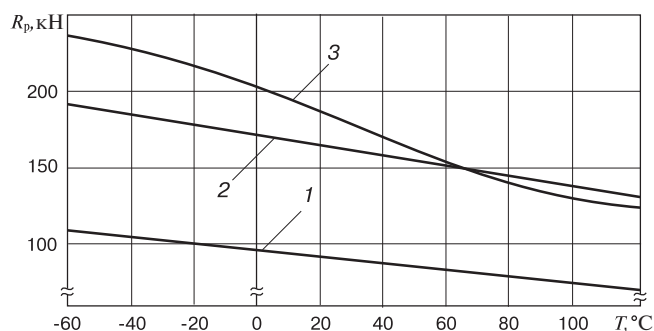


Рис. 7. Зависимости предельных разрушающих нагрузок соединения «стеклопластиковый стержень — оконцеватель» натяжных (1), фиксаторных (2) и консольных (3) полимерных изоляторов от температуры

Fig. 7. Dependencies of the limiting destructive loads of the joint “fiberglass rod — end terminal” of tension (1), fixation (2) and console (3) polymer insulators on the temperature

Функции долговечности образцов при различных температурах построены после их усреднения. Время жизни образцов показано на рис. 8.

Известно, что в основе метода ТВА лежит предположение о подобии физических, термоактивационных и других процессов, протекающих в материале в условиях нагружения при высоких и рабочих температурах. Чтобы осуществить прогноз долговечности

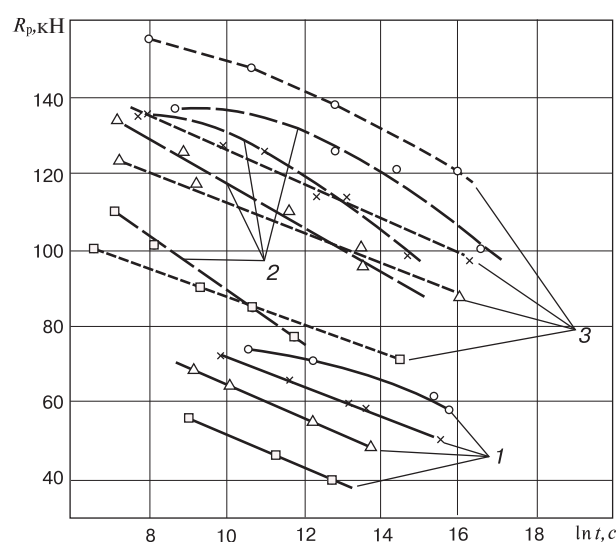


Рис. 8. Зависимости предельных разрушающих нагрузок натяжных (1), фиксаторных (2) и консольных (3) полимерных изоляторов при температурах 20 °С (кружки), 55 °С (крестики), 75 °С (треугольники), 120 °С (квадратики)

Fig. 8. Dependencies of limiting breaking loads of tension (1), fixation (2) and console (3) polymer insulators at temperatures of 20 °С (circles), 55 °С (crosses), 75 °С (triangles), 120 °С (squares)

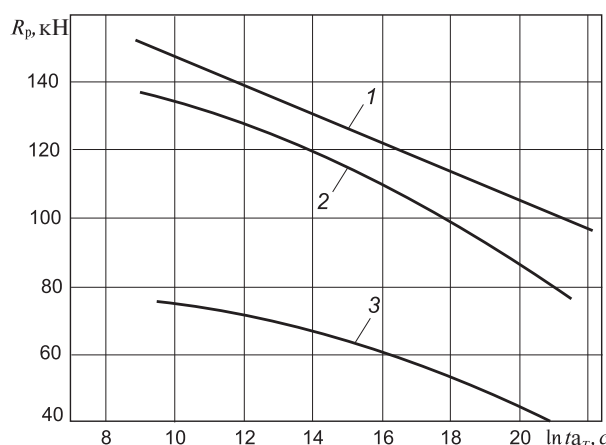


Рис. 9. Обобщенные кривые длительной прочности натяжных (1), фиксаторных (2) и консольных (3) полимерных изоляторов
Fig. 9. Generalized curves for the long-term strength of tension (1), fixation (2) and console (3) polymer insulators

образцов, необходимо пересчитать результаты испытаний с высоких температур на рабочие.

В качестве базовой была выбрана температура, равная 20 °С. Воспользуемся рекомендациями работы [8] и осуществим сдвиг вдоль оси времени ($\ln t$) кривых долговечности для температур, равных 55, 75 и 120 °С, с кривой для T_0 . Для этой цели последовательно определим, начиная с базовой кривой, сдвиг для фиксированных уровней нагружений внутри экспериментального окна:

$$\ln t' - \ln t = -\ln a_T^a(T), \quad (8)$$

где t' — время наблюдения при некоторой характеристической температуре T_i ; t — время при температуре T_0 ; $a_T^a(T)$ — функция температурного сдвига.

Долговечность полимерных изоляторов контактной сети
Durability of polymer insulators of the contact network

Уровень нагружения от разрушающей нагрузки	Долговечность изолятора		
	Натяжного	Фиксаторного	Консольного
0,8	49 ч	88,6 ч	1,1 ч
0,7	578 ч	1068 ч	69,8 ч
0,6	284 сут	535 сут	241,8 сут
0,5	9 лет	17,7 лет	55 лет
0,4	31 год	56,9 лет	—

Осуществляя на каждом этапе усреднения, построим функцию температурно-временного сдвига $\ln a_T^a(T) = f(T - T_0)$, которую в дальнейшем аппроксимируем уравнением Вильямса — Лендела — Ферри:

$$\ln a_T^a = [c_1 (T - T_0)] / [c_2 + (T - T_0)], \quad (9)$$

где c_1 и c_2 — коэффициенты, зависящие от T и действующей на полимерный изолятор нагрузки R_p , определяемые опытным путем.

Значения коэффициентов c_1 и c_2 для каждого типа полимерного изолятора получены соответственно равными 147,46 и 1921,71 для натяжных, 13,84 и 238,19 для фиксаторных, 156,49 и 972,77 для консольных. Найденные из выражения (9) значения $\ln a_T^a$ используем для построения кривой длительной прочности для каждого типа полимерного изолятора. При этом все экспериментальные данные долговечности, расположенные во временном интервале $t_{\min} - t_{\max}$, сдвигаем вдоль оси временной шкалы на соответствующие значения $\ln a_T^a$.

Приведенное время для долговечностей полимерных изоляторов определим согласно [3] из выражения

$$\ln t a_T = \ln t + \ln a_T^a. \quad (10)$$

Эти кривые построены для каждого типа изолятора (рис. 9).

Воспользуемся выражением, найденным в [6] для определения времени t до разрушения образца через действующее на него напряжение:

$$t_* = A e^{-b\alpha}, \quad (11)$$

где A , b — константы; $\alpha = R_i / R_p$ (R_p — предельная разрушающая нагрузка для полимерного изолятора при температуре, равной 20 °С).

Аппроксимируя экспериментальные данные для натяжных, фиксаторных и консольных изоляторов, получим соответствующие зависимости:

$$t_{*n} = 1,86 \cdot 10^{10} \exp(-24,7\alpha); \quad (12)$$

$$t_{*ф} = 3,893 \cdot 10^{10} \exp(-24,89\alpha); \quad (13)$$

$$t_{*к} = 1,91 \cdot 10^{10} \exp(-44,204\alpha). \quad (14)$$

Эти выражения используем для оценки долговечности полимерных изоляторов при различных уровнях нагружений. Проведенные вычисления при разных условиях нагружения сведены в таблицу.

Закключение. Анализ экспериментальных кривых долговечности позволил установить порядок изменения долговечности полимерного изолятора в зависимости от действующей на него нагрузки. В качестве нагрузки, при которой обеспечивается надежная работа полимерного изолятора на протяжении 30 лет, может быть принята нагрузка для натяжных изоляторов, составляющая не более 40 % от разрушающей, для фиксаторных и консольных не более 45 и 50 % соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лукьянов А. М., Чепелев Ю. Г., Бардин А. Н. Разрабатываем полимерные консоли // Мир транспорта. 2016. Т. 14. № 3. С. 60–66.
2. Лукьянов А. М., Чепелев Ю. Г. Полимерные изоляторы для устройств контактной сети // Мир транспорта. 2016. Т. 14. № 5. С. 56–64.
3. Применение полимерных изоляторов в устройствах контактной сети электрифицированных железных дорог / Ю. И. Горюшков [и др.]. М.: Транспорт, 1987. 48 с.

4. Shaokuan Chen, Xiu-dan Wang, Yun Bai, Hai-dong Liu, Bao-huo Mao. *Tiedao xuebao* // J. China Railway Soc. 2013. Vol. 35. № 12. P. 37–42.

5. Kökényesi Miklós, Kunz Dietmar. *Oberleitung Sicat SX – Zulassung und Betriebserfahrung in Ungarn* // Elektrische Bahnen. 2013. Vol. 111. № 6–7. P. 440–444.

6. Фрейдин А. С. Прочность и долговечность клеевых соединений. М.: Химия, 1981. 270 с.

7. Потапов В. Д., Лукьянов А. М. Оптимизация параметров конструкции клеевого захвата натяжных полимерных изоляторов // Вестник ВНИИЖТ. 1986. № 4. С. 15–18.

8. Кравчук А. С., Майборода В. П., Уржумцев Ю. С. Механика полимерных и композиционных материалов. М.: Наука, 1985. 304 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ЛУКЬЯНОВ Анатолий Михайлович,

д-р техн. наук, профессор, кафедра «Строительная механика», ФГБОУ ВО РУТ (МИИТ)

ЧЕПЕЛЕВ Юрий Георгиевич,

заведующий отделом «Системы тягового электроснабжения железных дорог», АО «ВНИИЖТ»

ЛУКЬЯНОВА Анна Александровна,

инженер, ассистент кафедры «Теоретическая механика», ФГБОУ ВО РУТ (МИИТ)

Статья поступила в редакцию 01.02.2018 г., принята к публикации 28.04.2018 г.

Reliability and durability of polymer insulators of the contact network

A. M. LUK'YANOV¹, Yu. G. CHEPELEV², A. A. LUK'YANOVA¹

¹Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Russian University of Transport" (FGBOU VO RUT (MIIT), Moscow, 127994, Russia

²Joint Stock Company "Railway Research Institute" (JSC "VNIIZhT"), Moscow, 129626, Russia

Abstract. On the network of electrified railroads and power lines of advanced countries there is an intensive work undergoing on the conversion of traditional insulating structures made of porcelain and glass to new ones – polymeric. In order to minimize mechanical damage, it is necessary first of all to investigate the stress-strain state in the connection zone "end terminal – fiberglass rod", and on the basis of the results obtained, to develop a number of design solutions that make it possible to provide the required reliability of such connection.

The analysis of the stress-strain state and the strength of the joint between the fiberglass rod and the end terminal is of greatest interest, taking into account the viscoelastic properties of the glue (glue creeping).

Authors present a method for calculating axis-symmetric glue joints of polymer insulators based on the finite element method. The stress state of the junction zone ("end terminal – fiberglass rod") is analyzed.

Optimum sizes of the glue-joint connection of the insulator are determined taking into account the viscoelastic properties of the glue.

The results of testing the models of polymer insulators of the contact network in the temperature range –60 ... + 100 °C are given and the life of tension (suspension), fixation and console polymer insulators is estimated on the basis of the principle of temperature-time analogy.

The proposed technique for assessing the stress-strain state of the glued joint of polymer insulators, taking into account the viscoelastic properties of the adhesive, allows to determine the optimal parameters of the end caps, taking into account the time of action of the load on the insulator.

An analysis of the experimental curves of durability has made it possible to establish the norms governing the change in the durability of a polymer insulator, depending on the load acting on it. A load, that provides reliable operation of the polymer insulator for 30 years, can be accepted for tension insulators, which is not more than 40 % of the destructive insulator, and for fixative and console – not more than 45 and 50 % respectively.

Keywords: contact network; polymer insulators; axis-symmetric glue joints; reliability; durability; finite element model

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-2-110-117>

E-mail: Chepelev.yuri@vniizht.ru (Yu. G. Chepelev)

REFERENCES

1. Luk'yanov A. M., Chepelev Yu. G., Bardin A. N. *How to develop polymeric consoles*. The World of Transport and Transportation, 2016, Vol. 14, no. 3, pp. 60–66.

2. Luk'yanov A. M., Chepelev Yu. G. *Polymer insulators for contact network devices*. The World of Transport and Transportation, 2016, Vol. 14, no. 5, pp. 56–64.

3. Goroshkov Yu. I., Il'in V. N., Luk'yanov A. M., Chepelev Yu. G. *Primenenie polimernykh izolyatorov v ustroystvakh kontaktной seti elektrifitsirovannykh zheleznikh dorog*. Moscow, Transport Publ., 1987, 48 p.

4. Shaokuan Chen, Xiu-dan Wang, Yun Bai, Hai-dong Liu, Bao-huo Mao. *Tiedao xuebao*. J. China Railway Soc. 2013, Vol. 35, no. 12, pp. 37–42.

5. Kökényesi Miklós, Kunz Dietmar. *Oberleitung Sicat SX – Zulassung und Betriebserfahrung in Ungarn*. Elektrische Bahnen, 2013, Vol. 111, no. 6–7, pp. 440–444.

6. Freydn A. S. *Prochnost' i dolgovechnost' kleevykh soedineniy*. Moscow, Khimiya Publ., 1981, 270 p.

7. Potapov V. D., Luk'yanov A. M. *Optimization of design parameters for glue gripping of tension polymer insulators*. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 1986, no. 4, pp. 15–18.

8. Kravchuk A. S., Mayboroda V. P., Urzhumtsev Yu. S. *Mekhanika polimernykh i kompozitsionnykh materialov*. Moscow, Nauka Publ., 1985, 304 p.

ABOUT THE AUTHORS

Anatoliy M. LUK'YANOV,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department "Construction mechanics", FGBOU VO RUT (MIIT)

Yuriy G. CHEPELEV,

Head of the Department "Traction power supply systems of railways", JSC "VNIIZhT"

Anna A. LUK'YANOVA,

Engineer, Assistant of the Department "Teoretical mechanics", FGBOU VO RUT (MIIT)

Received 01.02.2018

Accepted 28.04.2018