

# АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ НА НАДЁЖНОСТЬ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Р.Н. Журиков

Томский политехнический университет  
группа З-А1-27

На кабельные изделия в процессе эксплуатации и хранения действуют различные сочетания климатических, механических и электрических факторов. Кроме того, любой из этих факторов (тепло, холод, вибрация и пр.) не является постоянным по величине, изменяясь во времени.

На надёжность кабельных изделий в основном влияют рабочие температуры, особенно их циклические чередования с отрицательными температурами при этом безотказность может быть описана законом, выраженным эмпирической формулой [1]:

$$\ln(\tau) = \frac{A}{T} + B, \quad (1)$$

где  $\tau$  – долговечность, или время в часах до выхода из строя, при абсолютной температуре  $T$ ;  $A$  и  $B$  – коэффициенты, зависящие от материалов, применяемых в кабеле.

Уравнение (1) схоже с уравнением Аррениуса и показывает, что физико-химические процессы в материалах кабельных изделий при тепловом старении подчиняется общим закономерностям кинетики химической мономолекулярной реакции, постоянная скорости которой определяется по формуле:

$$K = K_{\infty} \cdot \exp\left(-\frac{E}{R \cdot T}\right), \quad (2)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная (кал/град.г.моль);  $T$  – абсолютная температура (К);  $E$  – энергия активации, (кал/г.моль);  $K_{\infty}$  – постоянная скорости при  $T = \infty$ .

В полулогарифмическом масштабе координат уравнение (1) имеет вид прямой линии, что дает теоретическую базу для экстраполяции экстремальных данных в область более низких температур, т. е. для проведения ускоренных испытаний на безотказность кабельных изделий, которая определяется в основном сроком жизни изоляционных и шланговых материалов.

Определение закономерностей, характеризующих физико-химические процессы изменения материалов, позволяет разрабатывать и применять на практике модели отказов, имитировать условия эксплуатации и прогнозировать время ожидаемого отказа или время гарантированной наработки без отказов.

В качестве наиболее общих физико-химических процессов в материалах конструкции изделий, которые могут быть связаны в той или иной степени с постепенным или скачкообразным отказом обычно указывают процессы, вызывающие необратимое ухудшение работоспособности изделий при их эксплуатации и хранениях. Такие процессы, объединяемые под собирательным термином «старение», могут включать в себя диффузионные процессы в объеме и на поверхности твердых тел, перемещение и скопление точечных дефектов в кристаллической структуре, флуктуационный разрыв межатомных связей в металлах и сплавах, разрыв химических связей цепей макромолекул полимерных материалов, сорбционные процессы, структурные превращения, окисление радикалов молекул полимеров и др. [2].

Даже в наиболее простых элементах конструкции могут протекать при соответствующих режимах работы и внешних условиях многие физико-химические процессы, способные привести к отказу изделия. Достижение критичных изменений, устанавливается при этом посредством контроля структурных или структурно-чувствительных параметров.

Данная методика позволяет определить условную энергию активации  $E$  преобладающего физико-химического процесса старения и планировать испытания в форсированных режимах. При этом определение величины  $E$  возможно при одном режиме испытаний, тогда как при применении традиционных методов величина  $E$  устанавливается по отказам не менее, чем при 3-х испытательных режимах (температурах).

В данной работе проведен анализ испытаний основного проводникового материала в кабельной промышленности – медной проволоки, для защиты от коррозии и старения которую в большинстве случаев покрывают слоем олова, серебра, реже никеля и олово-никелевого сплава.

Проводниковые материалы подвергались испытаниям в воздушной среде при температурах (от 85 до 600 °С), а также в коррозионных средах – морской воде, соляном тумане, 98 %-ой относительной влажности при температуре 40 °С. Контролировался внешний вид, удельное электрическое сопротивление  $\rho$  и механические свойства (временное сопротивление разрыву  $\sigma$  и относительное удлинение  $\delta$ ).

В реальных условиях эксплуатации проводниковые элементы исследуемых кабельных изделий не подвергаются непосредственному воздействию морской воды. От воздействия повышенной влажности воздуха и соляного тумана проводниковые элементы в достаточной степени защищены изоляцией и покровными оболочками, а также корпусом аппаратуры, внутри которой размещаются многие типы кабельных изделий (низковольтные монтажные провода, бортовые ленточные провода, миниатюрные радиочастотные кабели). К этому следует добавить наличие герметичных или влагоуплотненных кабельных разъемов.

Поэтому основным процессом, приводящим к необратимому ухудшению проводниковых элементов, является тепловой, старение, как в воздушной среде, так и без неё (в изоляционной «оболочке»).

Медная проволока интенсивно окисляется на воздухе при температурах выше 225 °С. При температуре 200 °С и выше в медной проволоке происходит значительный рост зерен, а также значительное не только наружное и внутреннее окисление (по телу зерен и между ними). Эти факторы влияют на механические и электрические свойства проводника, снижая его прочность и пластичность и увеличивая сопротивление.

В условиях герметизации существенного окисления меди не происходит до 300 °С. Таким образом, при длительной эксплуатации проводов и кабелей применение медного внутреннего проводника допустимо при температуре не выше 150 °С.

В медной лужёной оловом проволока под действием повышенной температуры развиваются процессы, характерные для каждого из сочетаемых компонентов, а также происходит взаимная диффузия между сердечником и антикоррозийным покрытием. В результате реакции взаимодействия диффундирующих элементов возникает ряд химических соединений (интерметаллоидов), характеризующихся определенными физическими и механическими свойствами, отличными от элементов, составляющих химические соединения.

Взаимная диффузия между оловом и медью наблюдается уже при 150°С с постепенным образованием интерметаллического сплошного слоя, которому присущи пониженные механические свойства. Таким образом, рекомендуется медную луженую оловом проволоку, защищенную изоляцией, длительно эксплуатировать при температуре не выше 180°С.

При воздействии высокой температуры на медную посеребренную проволоку происходит ряд явлений:

- рост зерен медного сердечника,
- взаимная диффузия металлов,
- самодиффузия серебра,
- внешнее и внутреннее окисление поверхности проводника.

Диффундирующие компоненты при взаиморастворении образуют смесь кристаллов обоих компонентов в определенном соотношении. Наличие интерметаллоидов в граничном слое резко меняет свойства медной посеребренной проволоки. Таким образом, медную посеребренную проволоку, защищенную изоляцией, рекомендуется длительно использовать при температуре до 200 °С.

Аналогичные процессы, но более медленные, имеют место в медной никелированной проволоке, которая в составе кабельных изделий может длительно работать при температуре до 250 °С.

Процесс старения проводниковых материалов описывается, как и для изоляционных материалов, эмпирическим уравнением, условно называемым уравнением Аррениуса. Условно – так как классическое уравнение Аррениуса, справедливо для химической реакции, тогда как при старении материалов «протекает» комплекс физических и химических процессов и превращений. В общем виде уравнение Аррениуса применительно к кабельным изделиям и элементам их конструкции представляет экспоненциальную зависимость времени старения от величины, обратной абсолютной температуре. Характеристикой такой зависимости является коэффициент, который принято называть условной энергией активации  $E$  [3].

При обобщении результатов испытаний проводниковых материалов при различных значениях повышенных температур были рассчитаны значения величины  $E$  в диапазоне температуры от 100 °С до 250 °С. Расчёт проводился для разных критериальных параметров  $\rho$ ,  $\sigma$ ,  $\delta$  и уровней. Данные расчёта приведены на рисунке 1.

На основе полученных данных, значение условной энергии активации проводниковых материалов можно принять в среднем равным 20 ккал/г.моль. Эта величина близка к значению условной энергии активации полиэтиленовой и поливинилхлоридной изоляции ((16,3-22,3) ккал/г.моль), но значительно уступает величине  $E$  для фторопластовой изоляции (26,7 ккал/г.моль).

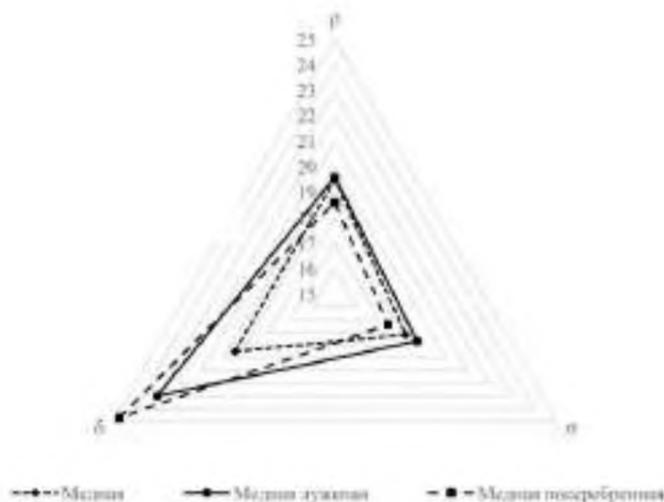


Рис. 1. Значения условной энергии активации для разных критериальных параметров

Исходя из разницы в значениях  $E$  между проводниковыми материалами и изоляционными, правомерно утверждать, что для многих теплостойких проводов и кабелей при испытаниях на надёжность в фиксированных (ускоренных) режимах, слабым местом является не изоляция, а токопроводящие жилы и электрические экраны.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Кранифельд Л.И., Потапов С.Н., Дудкевич А.Н.: надёжность кабелей и проводов для радиоэлектронной аппаратуры. – М: Информэлектро, 1990. – 47 с.
2. The Non-Probabilistic Reliability Analysis of Stayed-Cable Based on the Interval Algorithm / Shan Shan Cao, Jun Qing Lei, Kun Zhang // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – V. 455. – P. 267–273.
3. Ageing and reliability of electrical insulation: the risk of hybrid AC/DC grids / Gian Carlo Montanari, Peter Morshuis, Paolo Seri, Riddhi Ghosh // The Institution of Engineering and Technology. – 2020. – V. 5. – P. 620–627.

Научный руководитель: доцент, к.т.н. А.П. Леонов, доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ.