



ОПЫТ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИЧИНЫ ОТКАЗА В ЭКСПЛУАТАЦИИ И ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА КАБЕЛЯ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ ПОЛИЭТИЛЕНА

V.V. Bannov, *Cand. Sc. (Engineering), Deputy General Director, Technical Director of JSC "Samara Cable Company";*

A.A. Kryuchkov, *Cand. Sc. (Chemistry), Leading Research Scientist, OJSC VNIIEP;*

T.A. Stepanova, *Research Scientist, OJSC VNIIEP;*

M.Yu. Shuvalov, *Dr. Sc. (Engineering), Director of Research Area – Division Manager, OJSC VNIIEP*

В.В. Баннов, *канд. техн. наук, заместитель генерального директора, технический директор АО «Самарская Кабельная Компания»;*

А.А. Крючков, *канд. хим. наук, ведущий научный сотрудник ОАО «ВНИИКП»;*

Т.А. Степанова, *научный сотрудник ОАО «ВНИИКП»;*

М.Ю. Шувалов, *д-р техн. наук, директор научного направления – заведующий отделением ОАО «ВНИИКП»*

Аннотация. Рассматриваются возможные причины появления трещин в ПЭ изоляции низковольтного кабеля, бывшего в эксплуатации в течение 5 лет, на основе результатов исследований разных участков изоляции методами ДСК, ИК Фурье-спектроскопии, визуальной световой микроскопии, фотомикро- и фотомacroграфии, а также испытаний изолированных жил в поверхностно-активной среде при повышенной температуре. Анализ полученных данных приводит авторов к заключению о том, что ни окисление, ни перестройка надмолекулярной структуры материала изоляции не могли стать причиной раннего отказа. В качестве единственной реальной причины возникновения повреждений изоляции в виде опоясывающих трещин указываются проведённые ранее монтажные работы. Оценка остаточного срока службы по критерию растрескивания даёт значение порядка 40 лет.

Ключевые слова: ПЭ изоляция, трещина, ДСК, ИК Фурье-спектроскопия, визуальная микроскопия, фотомикрография, фотомacroграфия, окисление, рекристаллизация.

Abstract. The possible origin of the low voltage cable PE insulation cracking is considered, the cable has been 5 years in operation. The analytical methods used are as follows: DSC, FTIR, visual light microscopy, photomicrography, and photomacrography. In addition, insulated conductors were tested in surface-active substance at elevated temperature. The data obtained permit to conclude that neither oxidation, nor rearrangement of supramolecular structure are responsible for premature failure. It is concluded that installation work is the only reason of the damage. The residual life time estimation, based on cracking criteria, equals to 40 years.

Key words: PE insulation, crack, DSC, FTIR, visual microscopy, photomicrography, photomacrography, oxidation, recrystallization.

*Материал поступил в редакцию 12.08.2020
E-mail: shuvalov@vniikp.ru*

ВВЕДЕНИЕ

Долговечность полиэтиленовой изоляции кабельных изделий, понимаемая как время до появления в ней магистральных трещин, является сложной характеристикой и зависит от множества факторов. Одна группа таких факторов относится к молекулярной и надмолекулярной структуре самого полимера. Так, например, полиэтилен (ПЭ) с большей молекулярной массой и более узким молекулярно-массовым распределением имеет меньшую склонность к растрескиванию. Важна также надмолекулярная структура, приобретённая в процессе переработки в изделие, в частности степень кристалличности полимера, а также масштабы её изменения в ходе эксплуатации изделия. К другой группе факторов следует отнести условия эксплуатации: температуру, механические напряжения, присутствие кислорода и поверхностно-активных веществ (ПАВ). Наконец, стойкость ПЭ к растрескиванию зависит от содержащихся в нём добавок – таких как антиоксиданты, антипирены, пигменты и красители и др., и от их распределения в полимерной матрице.

В настоящей статье приведены результаты исследований полиэтиленовой изоляции кабеля, бывшего в эксплуатации в течение 5 лет. Интерес к этому объекту был обусловлен тем, что на концевых (монтажных) участках кабеля, на которых защитная оболочка была удалена, в изоляционном слое присутствовали сквозные трещины, и необходимо было выяснить возможные причины возникновения подобных повреждений. В качестве основных возможных причин мы рассматривали следующие:

- несоответствие марки и качества материала требованиям нормативной документации (НД) на изделие;

- необратимые изменения химической и надмолекулярной структуры полимера как результат старения материала, в частности его окисления;

- особенности монтажа кабеля.

1. ИДЕНТИФИКАЦИЯ МАТЕРИАЛА ИЗОЛЯЦИИ

Результаты исследования надмолекулярной структуры и термоокислительной стабильности материала (рис. 1), полученные методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) [1, 2], показали, что материал изоляции представляет собой композицию полиэтилена высокой плотности (ПЭВП) марки 271-70К, что соответствует НД на изделие.

Оценку возможных изменений термоокислительной стабильности материала вследствие старения проводили методами ДСК и инфракрасной Фурье-спектроскопии (ИКС). Для сравнения использовали изоляцию образца недавно изготовленного кабеля той же марки (образец сравнения).

Визуальный осмотр изолированных жил кабеля вне оболочки выявил наличие повреждений в виде сквозных кольцевых трещин, причём их локализация носила явный системный характер – подавляющее большинство повреждений расположено парами на концах открытых участков.

Единичные повреждения были обнаружены также на некотором удалении от концов в местах очень тугой стяжки пучка изолированных жил шпагатом. Ка-

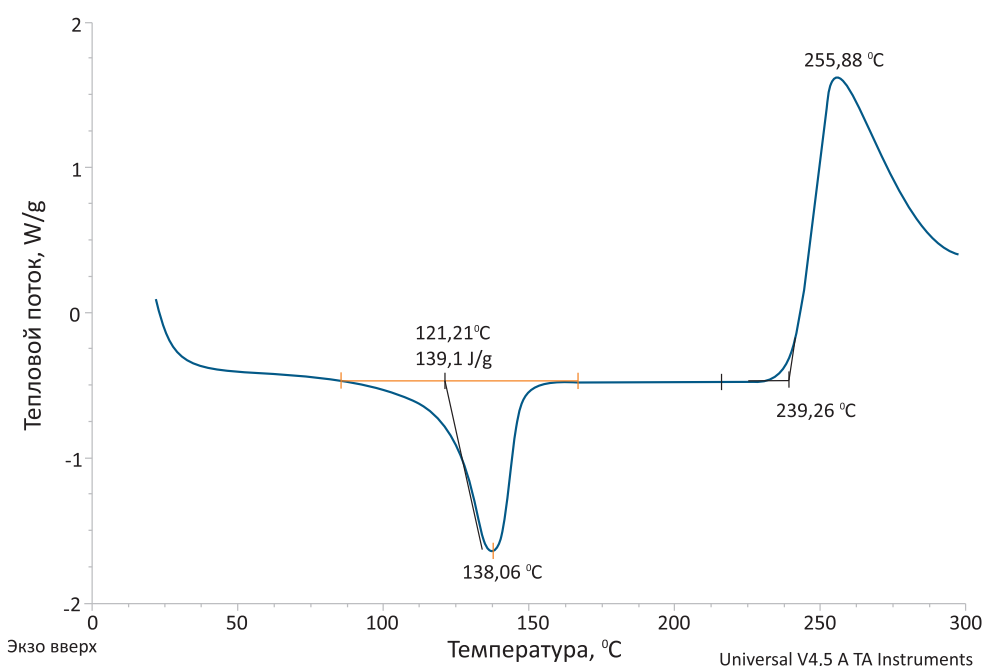


Рис. 1. Характеристики материала изоляции, измеренные методом ДСК: температура плавления

$T_{пл} = 138,06 \text{ }^\circ\text{C}$; энтальпия плавления $\Delta H_{пл} = 139,1 \text{ Дж/г}$; ТОИ = $239,26 \text{ }^\circ\text{C}$



ких-либо дефектов или повреждений на поверхности изоляции вдали от концов не было обнаружено даже с применением средств оптического контроля.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ОКИСЛЕНИЯ МАТЕРИАЛА ИЗОЛЯЦИИ

Оценку возможных изменений термоокислительной стабильности материала изоляции вследствие старения проводили методами ДСК и ИКС.

В табл. 1 приведены значения температуры окислительной индукции (ТОИ) в изоляции исследованных образцов кабеля.

Анализ полученных данных показывает, что ТОИ изоляции, находящейся под оболочкой, несколько выше, чем у соответствующих открытых участков изолированных жил вне оболочки, что является вполне ожидаемым результатом. Эта разница становится более заметной для проб, взятых непосредственно у трещин. Как и следовало ожидать, термоокислительная стабильность полиэтилена в образце недавно изготовленного кабеля выше, чем у кабеля после 5 лет эксплуатации.

В дополнение к методу ДСК была предпринята попытка оценить степень окисления материала по интенсивности полосы валентных колебаний карбонильных групп в инфракрасных (ИК) спектрах в интервале 1800–1650 см⁻¹. На рис. 2 приведены ИК-спектры образца изоляции под оболочкой и образца, включающего поверхность трещины.

Здесь следует обратить внимание на два момента. Первый – интенсивность полосы карбонильных групп ($\nu_{C=O}$, 1746 см⁻¹) материала в районе трещины соответствует содержанию карбонильных групп менее 0,01 моль/кг, что вряд ли может отразиться на физических свойствах диэлектрика.

Второй момент – в спектре проб, расположенных непосредственно у повреждений, присутствуют полосы средней интенсивности при 1261, 1090, 1021 и 800 см⁻¹, которые очень характерны для полиметилсилоксанов (рис. 3).

Присутствие полиметилсилоксана на поверхности изоляции в местах повреждений может являться важным и значимым дополнительным фактором, способствующим растрескиванию [3, 4].

Таблица 1
Значения ТОИ образцов материала изоляции

Цвет изоляции	Участок, место отбора	ТОИ, °С	
		наработка кабеля 5 лет	новый
бесцветный	внешний	219,5; 214,0	
	вблизи трещины	213,4	237,2
	участок с трещиной	215,2	235,9
	под оболочкой	239,3; 236,8	
коричневый	внешний	214,2	
	около трещины	209,5	231,8
	под оболочкой	217,7; 224,2	233,1
красный	внешний	229,2; 226,6	251,8
	под оболочкой	234,2; 237,1	251,5
зелёный	внешний	220,3; 220,2	235,5
	под оболочкой	228,7; 216,3	235,0
оранжевый	внешний	221,7	
	участок с трещиной	217,4	231,1
	участок с трещиной	215,2	232,4
	под оболочкой	230,1; 228,4	
серый	внешний	-	
	под оболочкой	218,9; 222,0	-
синий	внешний	-	
	под оболочкой	218,3; 214,8	

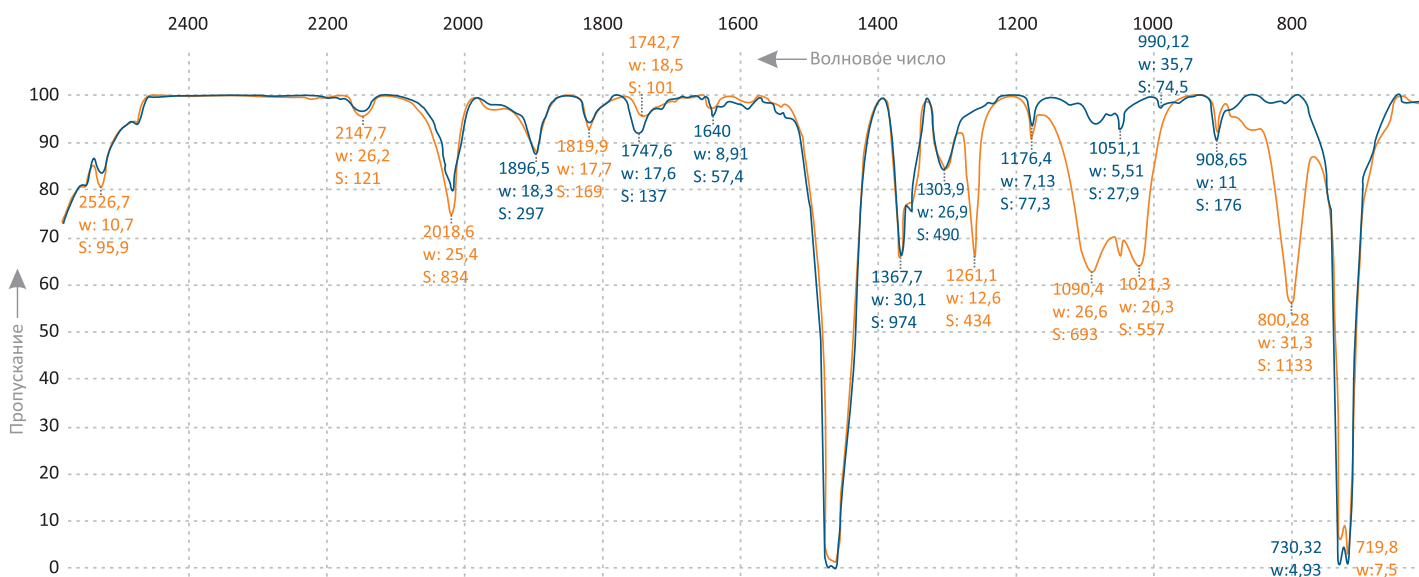


Рис. 2. ИК-спектры материала изоляции, взятого из разных участков изолированных жил кабеля: под оболочкой – синий, вблизи трещины – оранжевый

3. ИССЛЕДОВАНИЕ НАДМОЛЕКУЛЯРНОЙ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛА

При наложении изоляции из ПЭВП температурно-временные режимы экструзии в той или иной мере обуславливают незавершённость процесса его кристаллизации. Именно поэтому со временем могут наблюдаться эффекты, вызванные изменениями надмолекулярной структуры полимера, связанные со стремлением системы к равновесию. В [5] указывается на важную роль процесса низкотемпературной рекристаллизации как одного из механизмов старения

ПЭ при температурах ниже точки плавления и ниже обычных температур ускоренных испытаний на тепловое старение. Считается, что вследствие рекристаллизации в объёме полимера образуются микропустоты, которые локализуются на границах упорядоченных областей. При этом на проходных молекулах, участвующих в процессе рекристаллизации, могут возникать дополнительные внутренние напряжения, что повышает вероятность их разрыва и образования трещин в материале. Утверждается [5], что в результате этого процесса может быть достигнуто предельное состояние ПЭ, характеризующееся определённым критическим

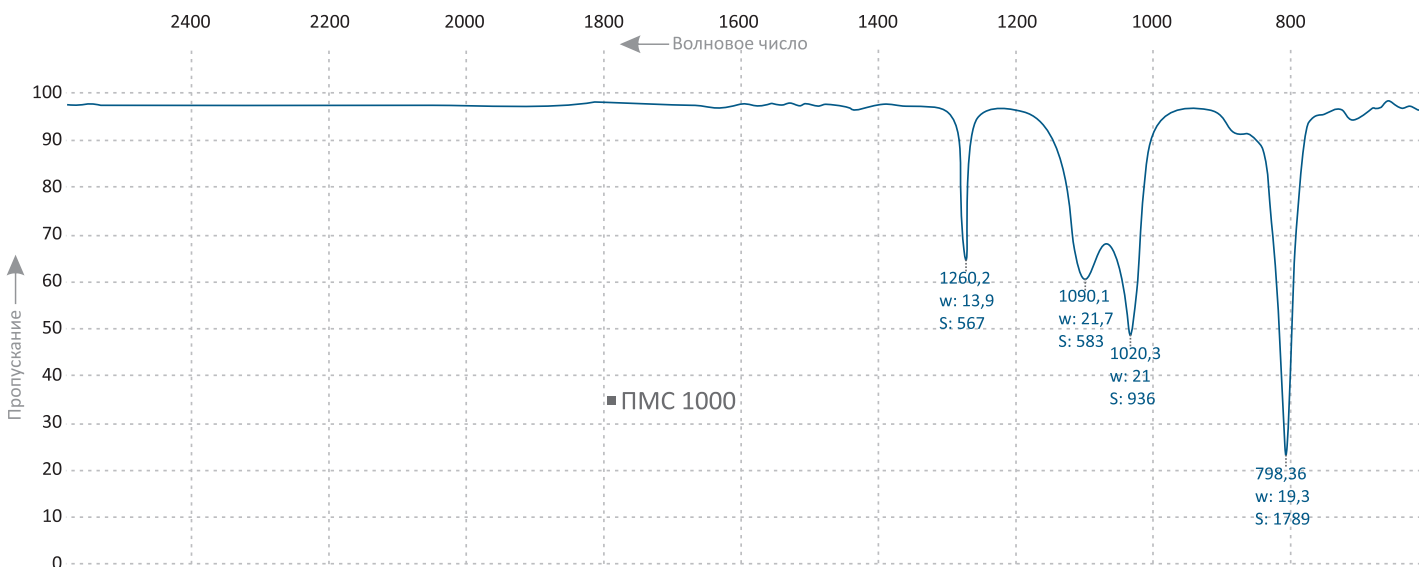


Рис. 3. ИК-спектр полиметилсилоксана (силиконовое масло ПМС 1000)



значением степени кристалличности (χ), но способ оценки её при этом не указывается.

Используя метод ДСК, мы определили степень кристалличности ПЭ в исследуемых образцах. Значения кристалличности χ рассчитывали при этом по формуле:

$$\chi(\%) = (\Delta H_{\text{пл}} / \Delta H_{\text{пл}}^0) \cdot 100, \quad (1)$$

где $\Delta H_{\text{пл}}$ – энтальпия плавления кристаллической фазы ПЭ в образце изоляции, Дж/г;

$\Delta H_{\text{пл}}^0$ – энтальпия плавления полимерного кристалла ПЭ, равная 295 Дж/г [6].

Согласно полученным результатам значения χ изоляции исследуемого кабеля на открытых участках изолированных жил и под оболочкой, независимо от окраски материала, практически одинаковы и составляют $(50,0 \pm 2,9)\%$ и $(49,5 \pm 1,7)\%$ соответственно. Это заметно выше содержания кристаллической фазы в образце сравнения – $(41,5 \pm 1,4)\%$, которое можно принять за начальную точку отсчёта. Значение степени кристалличности, максимально достижимое для материала изоляции ($\chi_{\text{пр}}$), составляет $(52,5 \pm 1,1)\%$. Этот результат получен с использованием образцов, специально приготовленных путём нагревания отрезков изолированных жил в термостате при температуре 120 °С в течение 6 часов, как рекомендовано в [6]. То есть, перестройка надмолекулярной структуры полимера в изоляции исследуемого кабеля пока ещё не завершена.

Вопрос о влиянии реструктуризации полимера на стойкость к растрескиванию решали, сопоставив описанные выше результаты с результатами испытаний в жидкой поверхностно-активной среде.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ ИЗОЛЯЦИИ К РАСТРЕСКИВАНИЮ В ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНОЙ СРЕДЕ

Одновременное воздействие на ПЭ повышенной температуры, механического напряжения и поверхностно-активной среды позволяет значительно ускорить испытания по определению его стойкости к растрескиванию.

При выполнении настоящей работы одинаковые для всех образцов механические напряжения создавали навиванием изолированных жил на металлический стержень, диаметр которого соответствовал тройному диаметру изолированной жилы. Образцы выдерживали в среде 20-процентного водного раствора поверхностно-активного вещества ОП-7 [7] при температуре (70 ± 1) °С.

Стойкость к растрескиванию оценивали по продолжительности «инкубационного периода» (ИП) [8]. Применительно к полимерам этот термин означает время накопления микрповреждений в материале без каких-либо видимых их проявлений вплоть до образования магистральной трещины.

На рис. 4 приведены графики временной зависимости количества трещин (N) для нескольких образцов изолированных жил. Величину инкубационного периода определяли как время, соответствующее точке пересечения наклонного участка временной зависимости с осью абсцисс.

Из полученных результатов следует, что время до начала растрескивания в условиях данного эксперимента составляет 4–92 часа, при этом нет принципиальных различий в ИП у образцов, находившихся под

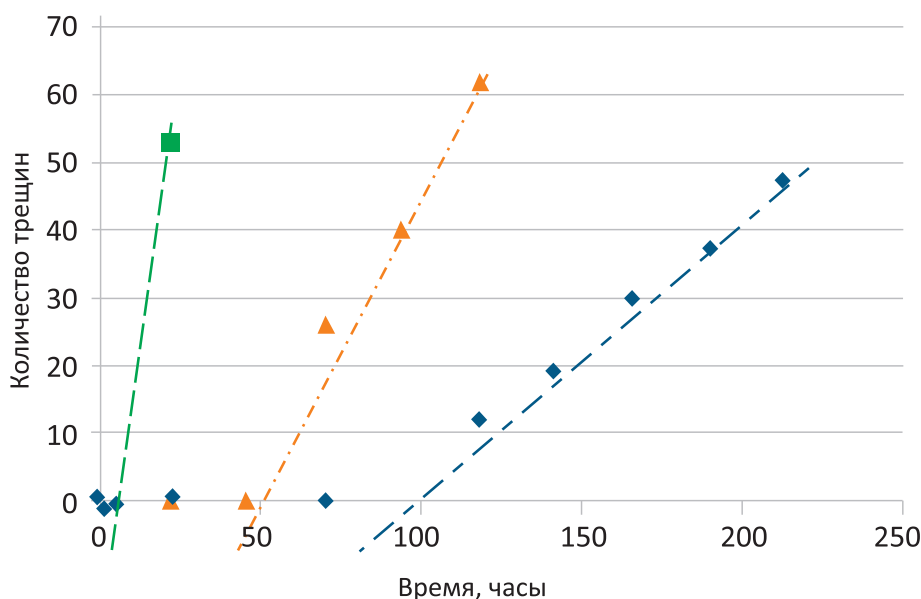


Рис. 4. К определению инкубационного периода. Маркеры цвета изоляции: □ – зелёная, в монтажной зоне и под оболочкой; ▲ – красная, в монтажной зоне и под оболочкой; ◊ – синяя, в монтажной зоне и под оболочкой

оболочкой и на открытом воздухе. Значения ИП для образца сравнения в среднем больше и составляют 98–180 часов, что можно связать с меньшим значением x для указанного кабеля. Это означает, что в будущем можно ожидать некоторого снижения стойкости к растрескиванию изоляции исследуемого кабеля вследствие продолжающегося процесса рекристаллизации. На данный момент физико-механические характеристики изоляции имеют довольно высокие средние значения: прочность при разрыве $\sigma_p = 17$ Н/мм² и относительное удлинение при разрыве $\varepsilon_p = 570$ %.

Полученные значения ИП позволяют оценить вероятный остаточный срок службы кабеля ($\tau_{ост}$) (время до растрескивания изоляции жил, находящихся под оболочкой). Отметим, что по нашей оценке, полученной с использованием данных физико-механических испытаний в результате навивания изолированной жилы на оправку, в изоляции возникают растягивающие механические напряжения около 10–15 Н/мм². Согласно [8] при испытаниях образцов ПЭВП в водном растворе эмульгатора ОП-10 при 70 °С снижение приложенного механического напряжения с 8 до 1 Н/мм² продлевает долговечность примерно на 3 десятичных порядка. Кроме того, по данным [8], долговечность образцов ПЭВП при переходе от поверхностно-активной среды к воздуху при той же температуре увеличивается в среднем ещё в 100 раз.

С учётом сказанного выше, если принять в расчёт минимальное экспериментальное значение ИП = 4 часа, то получим минимальное значение $\tau_{ост}$ недеформированного образца на воздухе приблизительно 400 000 часов или 46 лет.

К этому следует добавить, что данный прогноз соответствует температуре 70 °С. Для реального кабеля, эксплуатирующегося при более низкой температуре, прогноз долговечности будет ещё более оптимистичным. Отрицательный эффект, обусловленный рекристаллизацией полимера, в данной ситуации не имеет существенного значения.

Мы хотели бы дать более строгое теоретическое обоснование приведённой выше оценке остаточного ресурса. Однако анализ доступной нам литературы по проблеме длительной прочности полимеров при одновременном действии механических напряжений и поверхностно-активных сред не позволил найти какой-либо строгой теории.

В книгах, посвящённых данному вопросу, влияние среды учитывается лишь теми или иными поправками, вносимыми в хорошо известную формулу Журкова [9]:

$$\tau = \tau_0 \cdot \exp \left[\frac{w - \gamma \cdot \sigma}{R \cdot T} \right], \quad (2)$$

где τ – долговечность материала,
 τ_0 – период колебаний атомов,
 γ – структурно-чувствительный коэффициент,
 σ – приложенное механическое напряжение,
 W – энергия активации,
 R – универсальная газовая постоянная,
 T – абсолютная температура.

Различные авторы относят действие среды либо к предэкспоненциальному множителю τ_0 , либо к энергии активации, к структурно-чувствительному коэффициенту, либо же к эффективной величине механического напряжения [4, 10, 11]. При этом нет никаких достаточных оснований для того, чтобы предпочесть один из перечисленных подходов другому.

5. МИКРОСКОПИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТРЕЩИН, РАЗВИВШИХСЯ В ОБРАЗЦАХ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ И В УСЛОВИЯХ ИСПЫТАНИЙ

Микроскопический анализ выполнялся путём визуального микроскопирования, а также фотомикрографии и фотомакροграфии.

И визуальное обследование, и в ещё большей степени фотографирование обследуемых образцов столкнулись со следующей существенной трудностью: поверхность изоляции во всех случаях характеризуется выраженным микрорельефом, своего рода «микробугристостью». Участки отдельных микробугорков отражают свет в самых разных направлениях не только диффузно, но и со значительной зеркальной составляющей, то есть работают как микрзеркала, создавая значительную засветку, вуалирование (бликование) изображения поверхности, что сильно затрудняет его анализ.

Блики можно увидеть на рис. 5а, 5б, 6.

Для преодоления, хотя бы частичного, указанной трудности были апробированы различные приёмы визуальной микроскопии, фотомикро- и фотомакροграфии, перечисленные ниже.

Первоначальное визуальное микроскопирование осуществлялось с применением стереомикроскопа МБС-10, с использованием косоугольного освещения (при этом угол падения пучка света относительно поверхности образца варьировался в пределах примерно от 10 до 60 градусов) и бестеневого всестороннего освещения; затем, при большем увеличении – с применением микроскопа БИОЛАМ И, позволяющего наблюдать, и в дальнейшем фотографировать, объект по методу тёмного поля, с использованием эпиобъективов.

Наблюдения показали следующее.

1. Образцы, изъятые из эксплуатации, содержат только одиночные сквозные магистральные трещины, охватывающие изолированные жилы практически по всему периметру; более мелких и микроско-

пических трещин, с размерами от единиц до сотен микрометров, обнаружено не было. Заметим, что разрешающая сила основного, использованного для наблюдений и микросъёмки эпиобъектива, составляет примерно 1,5 микрона.

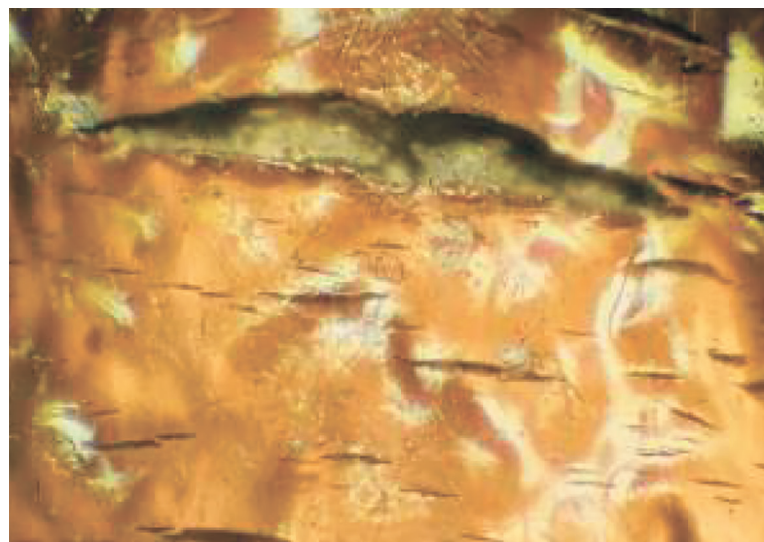
2. Напротив, на поверхности образцов, подвергавшихся воздействию распределённых механических напряжений и поверхностно-активного вещества в процессе ускоренных испытаний, наблюдаются многочисленные микротрещины с размерами, соответствующими вышеуказанному диапазону. Можно предположить, учитывая большую поверхностную концентрацию микротрещин, что в данном случае макроскопические трещины образовывались преимущественно путём слияния двух или более микротрещин. Исходя из этого, рассмотренный выше инкубационный период можно трактовать как время, необходимое для того, чтобы концентрация и размеры микротрещин достигли такого уровня, чтобы их объединение с образованием более крупной трещины становилось практически неизбежным.

Что же касается образования магистральных трещин в эксплуатации, то, с учётом сделанных наблюдений, в качестве самой вероятной причины их появления можно назвать нарушение целостности изоляции внешними локализованными механическими воздействиями, разрушительный эффект которых усиливался присутствием поверхностно-активной среды (так называемое абсорбционное понижение прочности, эффект Ребиндера).

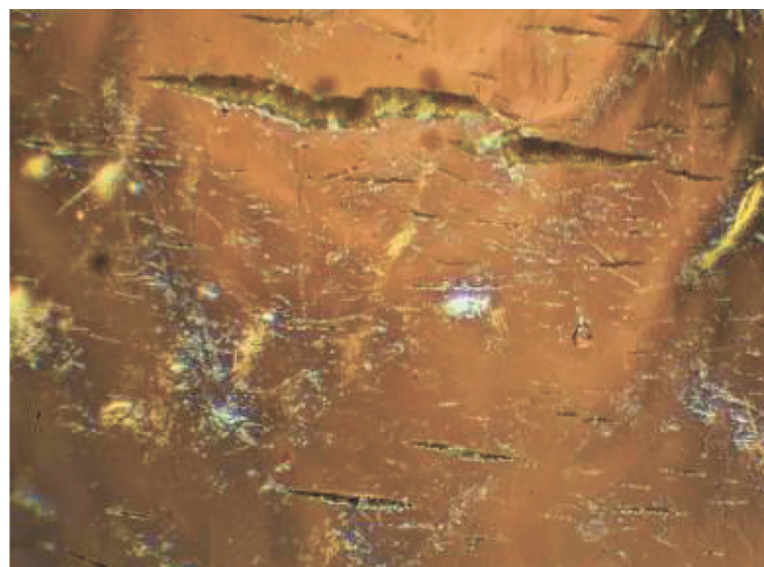
3. Относительно мелкие (во всяком случае, не сквозные), в том числе и микроскопические, трещины характеризуются своеобразным строением: их створки соединены «тяжами» из ориентированного полимера, которые постепенно рвутся по мере роста трещины. Очевидно, что процесс разрушения, будучи «макроскопически хрупким», то есть не сопровождающимся значительными деформациями, в то же время является «микроскопически вязким», связанным со значительным деформированием материала на микроуровне. Такое строение трещин (так называемые «трещины серебра» [12]) в полимерах замечено давно и позволило авторам монографии [9] сделать вывод о двухступенчатом процессе разрушения: сначала развивается трещина с тяжами и затем по мере разрушения тяжей образуется полный разрыв сплошности.

4. Такой двухстадийный механизм роста (но именно роста, а не образования) трещин является, по-видимому, довольно общим, на что указывают остатки тяжей, обнаруживаемые в магистральных трещинах, присутствующих в образцах кабеля, отказавших при эксплуатации.

Приводимые фотомикрографии были сделаны через микроскоп БИОЛАМ И с микрофотонасадкой



а)



б)

Рис. 5. Микрофотографии поверхностных микротрещин, сформировавшихся в процессе испытаний.
Ширина кадра 200 мкм

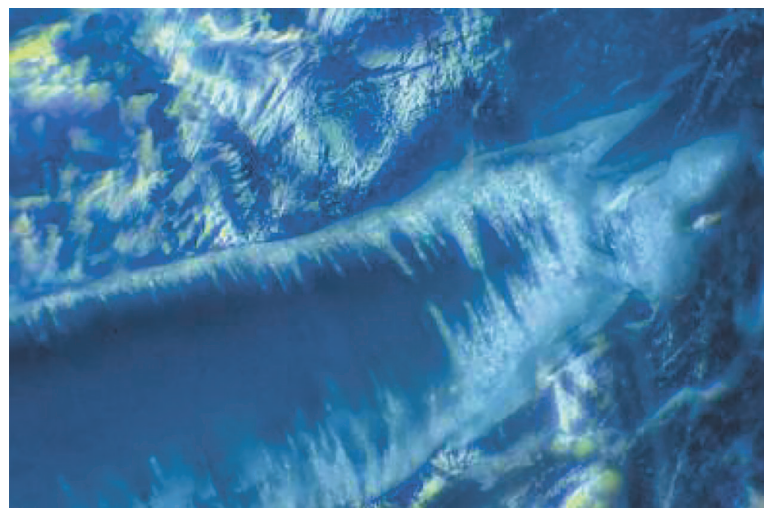


Рис. 6. Сравнительно крупная трещина с целыми и разорванными тяжами, образованная в процессе испытаний.
Ширина кадра 100 мкм

МФН-10 методом тёмного поля. Данный метод оказался относительно эффективным в подавлении бликов, хотя и не решает проблемы полностью – эти блики видны и на рис. 5а, 5б, где показаны микротрещины, и на рис. 6, где представлена более крупная трещина, содержащая как целые, так и разорванные тяжи.

Поскольку поверхность изолированной жилы цилиндрическая и имеет значительную глубину вдоль оптической оси, для фотомикрографии применялся метод "сборки фокуса" (focus stacking).

На рис. 7 показана **фотомacroграфия** разрыва изоляционного слоя, сформированного в эксплуатации.

Фотомacroграфическая установка была собрана на штативе фотоувеличителя. К вертикальной стойке последнего присоединены автоматические макро-рельсы, позволяющие дискретно перемещать фото-приёмник с шагом до 1 мкм включительно.

Фотоприёмник состоит из цифровой зеркальной камеры, соединённой с ЭВМ. К камере присоединён фотографический макро-мех, к переднему байонету которого, через переходник, присоединён объективный револьвер микроскопа, в который вворачивались специальные объективы для фотомacroграфии или микрообъективы с большими рабочими отрезками.

Для обеспечения независимых и при этом прецизионных перемещений фотографируемого объекта по трём линейным и трём угловым координатам было собрано устройство, состоящее из фокусирующего механизма и предметного столика микроскопа. На предметный столик был установлен универсальный столик Фёдорова [13]. К последнему мастикой и крепился образец.

Освещение образца при съёмке выполнялось фотовспышкой с беспроводным управлением, оборудованной системой освещения по Кёлеру [14], специально собранной авторами для фотомacroграфических работ.

Поскольку фотографируемые объекты отличаются значительными размерами по глубине (то есть вдоль оптической оси), многократно превосходящими глубину резко отображаемого пространства любого из используемых объективов, достаточная глубина резкости на результирующем снимке обеспечивалась также техникой «сборки фокуса».

Описанная техника эффективно работает в диапазоне увеличений от приблизительно 5х до 50х и более. Сведения о фотомacroграфии как методике можно найти, например, в [15].

На рис. 7 ясно видны фрагменты разорванных тяжей, иллюстрирующие сходство процессов роста трещин, имевших место в эксплуатации и при испытаниях. Необходимо, однако, подчеркнуть, что это

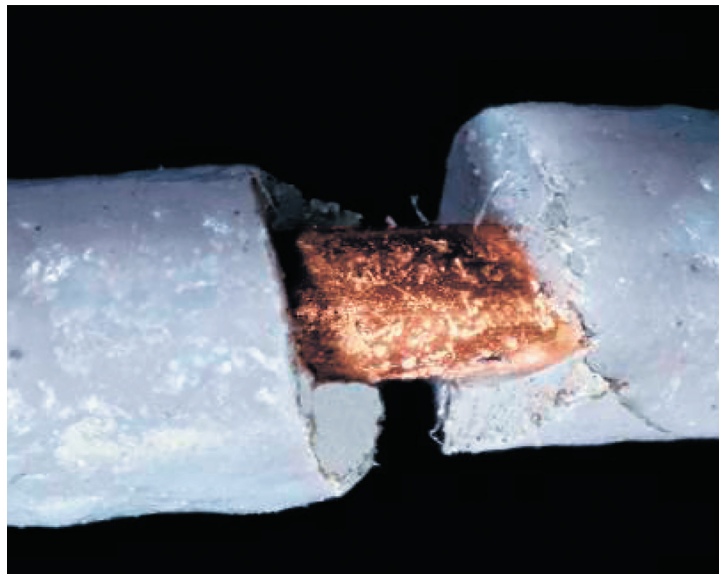


Рис. 7. Сплошной разрыв изоляционного слоя, развившийся при эксплуатации. Видны фрагменты разорванных тяжей

сходство ограничивается именно процессом развития трещин, но не их зарождения, образования, которое в условиях эксплуатации с высокой вероятностью обусловлено внешними, локализованными, скорее всего монтажными, воздействиями и присутствием поверхностно-активного вещества.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведённых исследований образца кабеля можно отметить следующее в отношении текущего физического состояния материала изоляции, возможных причин появления повреждений и перспектив дальнейшей эксплуатации кабеля:

- не найдено прямых свидетельств термоокислительной деструкции изоляции;
- процесс рекристаллизации в материале не окончен, но близок к завершению;
- наиболее вероятной причиной возникновения магистральных трещин на поверхности изоляции жил на открытом участке в процессе эксплуатации являются проведённые ранее монтажные работы, приведшие к значительным сосредоточенным механическим воздействиям и присутствию в местах развития повреждений и вблизи них силиконовой жидкости, проявившей себя как поверхностно-активное вещество (эффект Ребиндера);
- прогнозируемая долговечность изоляции жил в строительной длине кабеля в оболочке не ниже нормативного срока службы кабеля при сохранении условий его эксплуатации неизменными и при отсутствии внешних повреждающих механических воздействий.



Список литературы

1. ГОСТ Р 56724–2015 (ISO 11357-3:2011). Пластмассы. Дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК). Часть 3. Определение температуры и энтальпии плавления и кристаллизации. – М.: Стандартинформ, 2016. – 5 с.
2. ГОСТ Р 56756–2015 (ISO 11357-6:2008). Пластмассы. Дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК). Часть 6. Определение времени окислительной индукции (изотермическое ВОИ) и температуры окислительной индукции (динамическая ТОИ). – М.: Стандартинформ, 2016. – 12 с.
3. **Тынный А.Н.** Прочность и разрушение полимеров при воздействии жидких сред. – Киев: Наукова думка, 1975. – 206 с.
4. **Манин В.И., Громов А.И.** Физико-химическая стойкость полимерных материалов в условиях эксплуатации. – Л.: Химия, 1980. – 248 с.
5. **Брагинский Р.П., Моисеев Ю.В.** Роль физических процессов в старении полиэтилена // ДАН СССР. – 1984. – Т. 279, № 5. – С. 1139–1141.
6. **Берштейн В.А., Егоров В.М.** Дифференциальная сканирующая калориметрия в физикохимии полимеров. – Л.: Химия, 1990. – 248 с.

7. ГОСТ 13518–68. Пластмассы. Метод определения стойкости полиэтилена к растрескиванию под напряжением. – М.: Издательство стандартов, 1986. – 4 с.
8. **Гольдман А.Я.** Прогнозирование деформационно-прочностных свойств полимерных и композиционных материалов. – Ленинград: Химия, 1988. – 272 с.
9. **Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е.** Кинетическая природа прочности твёрдых тел. – М.: Наука, 1974. – 560 с.
10. **Борисов В.И.** Защитная способность изоляционных покрытий подземных трубопроводов. – М: Недра, 1987. – 126 с.
11. **Карташов Э.М., Цой Б., Шнвелёв В.В.** Разрушение плёнок и волокон. Структурно-статистические аспекты. – М: ЛЕНАНД, 2015. – 784 с.
12. **Бартенев Г.М.** Прочность и механизм разрушения полимеров. – М.: Химия, 1984. – 280 с.
13. Универсальный столлик Е.С. Фёдорова. – М.: Изд. АН СССР под редакцией академика А.И. Заварзина, 1953. – 837 с.
14. **Delly J.G.** Photography through the Microscope. – Kodak Books, 1998. – 104 p.
15. **Enrico Savazzi.** Digital Photography for Science. Close-up Photography, Macro photography and Photomacrography. – Print on Demand, 2011. – 698 p.

Снизить расходы на электроэнергию



**Мировой лидер
в технологии
холодной сварки**

Обращайтесь к нашим
агентам в России:
Телефон: (495) 361-6424, 918-1756
Факс: (495) 911-8060
E-mail: equipment@tdvniikp.ru
Pressure Welding Machines Ltd
Tel: +44 (0) 1233 820847
Email: pwm@btinternet.com

Новые сварочные агрегаты и колодки компании PWM можно приобрести только у компании PWM или её уполномоченных поставщиков.

Наши сварочные агрегаты, отличающиеся более низким энергопотреблением, чем электрические сварочные аппараты, основаны на современных гидравлических и пневматических системах и производят надёжные сварные соединения, более прочные, чем основной металл. Когда вы свариваете большие отрезки катанки, вы меньше платите по счетам за электроэнергию и у вас также меньше отходов.

Более подробная информация на: www.pwmltd.co.uk

