

# 4

## К ВОПРОСУ ВЫБОРА ОБЪЕКТИВНЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗНОСУ ПОЛИМЕРНОГО ПОКРЫТИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ НЕФТЕГАЗОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ И СООРУЖЕНИЙ

**В.Н. Протасов**  
РГУ нефти и газа  
им. И.М. Губкина

Во многих случаях одним из требуемых свойств противокоррозионного полимерного покрытия различных видов оборудования и сооружений нефтегазовой отрасли, определяющих срок его службы, является сопротивление износу.

При подвижном контакте покрытия с твердыми телами, контакте с потоком жидкости или газа возникают силы трения. Процесс постепенного изменения размеров покрытия при трении, проявляющийся в отделении с поверхности трения материала покрытия или его остаточной деформации, получил название изнашивания, а результат этого процесса принято называть износом.

Показателями сопротивления покрытия износу являются:

- при трении по твердым поверхностям — интенсивность изнашивания, представляющая собой отношение величины износа к пути трения, на котором он возник;
- при воздействии потока жидкости или газа — скорость изнашивания, представляющая собой отношение величины износа ко времени, в течение которого он возник.

По механизму разрушения материала полимерного покрытия при изнашивании различают изнашивание усталостное, абразивное и изнашивание посредством складок.

Усталостное изнашивание покрытия происходит при повторных, достаточно высоких напряжениях,

испытываемых одним и тем же объемом материала, покрытия, прилегающего к поверхности, в результате чего образуются микротрещины и происходит местное поверхностное отделение частиц материала покрытия. Реальные поверхности покрытия и соприкасающегося с ним твердого тела всегда волнисты и шероховаты, поэтому их контактирование происходит на отдельных малых площадках, называемых пятнами контакта. Число пятен контакта и их размеры зависят от нагрузки, деформационных свойств поверхностного слоя, волнистости и шероховатости соприкасающихся поверхностей. Под действием нормальной нагрузки неровности более твердой поверхности внедряются в поверхностный слой покрытия и в области пятен контакта возникают напряжения и деформации. В процессе внешнего трения происходит многократное деформирование микрообъемов поверхностного слоя покрытия в отдельных пятнах контакта. Это приводит к усталостному разрушению и последующему отделению материала покрытия. При относительно перемещении внедрившихся в покрытие микровыступов более твердого контртела в поверхностном слое пок-

рытия на пятнах контакта возникает сложное напряженное состояние. Перед выступом образуется зона сжатия, а за ним — зона растяжения. В результате возникает знакопеременный цикл нагружения.

Сопrotивление покрытия усталостному износу в паре трения с твердой поверхностью зависит от геометрии трущихся поверхностей, комплекса прочностных, деформационных и фрикционных характеристик покрытия, скорости скольжения, контактного давления и температуры. [1] В зависимости от величины контактного давления и деформационных характеристик материала полимерного покрытия циклическое деформирование поверхностного слоя полимерного покрытия может происходить при упругом, вязкоупругом и пластическом контакте. Для усталостного механизма изнашивания полимерных покрытий в паре трения с твердой поверхностью характерен упругий контакт.

Эксплуатационная среда оказывает существенное влияние на механизм и интенсивность изнашивания полимерных покрытий.

Жидкие среды, вступая в физическое или химическое взаимодействие с материалом покрытия, вызывают изменение его прочностных, деформационных и фрикционных свойств. Интенсивность этого изменения определяется природой материала покрытия и составом среды. Адсорбируясь на поверхностях трения, среда выполняет роль смазки. Эффективность смазочного действия среды зависит от ее химического состава и физико-химических свойств. При трении в жидких средах температура в зоне контакта снижается вследствие более интенсивного теплоотвода.

При усталостном механизме разрушения интенсивность изнашивания покрытия повышается с увеличением его адгезии к поверхности контртела, а также при трении по гладким поверхностям с низкой теплопроводностью. Этим объясняется, в частности, более высокий износ полимерных покрытий в паре трения с полимерами.

Абразивное изнашивание — механическое изнашивание материала покрытия в результате режущего или царапающего действия твердых тел. Абразивное изнашивание протекает при трении покрытия по шероховатым твердым поверхностям, а также при воздействии на покрытие твердых частиц, отделившихся от изнашиваемых поверхностей в процессе трения или попавших в зону трения

из внешней среды. Эти частицы могут либо свободно перемещаться в зоне трения, вызывая абразивный износ поверхностей при их относительном перемещении (износ незакрепленным абразивом), или, шаржируясь в поверхностный слой одной из трущихся поверхностей, вызывать абразивный износ другой (износ закрепленным абразивом). При абразивном изнашивании разрушение микрообъемов материала покрытия на пятнах контакта является одноцикловым процессом; предельное число циклов до разрушения  $n_{np} = 1$ .

По данным [1], сопротивление полимерных покрытий абразивному износу определяется комплексом его прочностных, деформационных и фрикционных характеристик, геометрией неровностей твердой поверхности, контактным давлением, скоростью относительного перемещения и температурой. Скорость относительного перемещения, как и температура, влияет на износ покрытия через изменение его прочностных, деформационных и фрикционных характеристик. В области малых скоростей скольжения модуль упругости слабо зависит от скорости. Коэффициент трения и интенсивность изнашивания практически остаются постоянными. В области больших скоростей скольжения с возрастанием скорости понижается коэффициент трения и уменьшается интенсивность изнашивания при условии, что температура не изменится. Однако с повышением скорости температура в зоне контакта может значительно возрасти, что приведет к увеличению износа. Регулирование температуры в зоне трения позволяет снизить износ при повышении скорости скольжения.

Сопrotивление полимерных покрытий абразивному износу значительно ниже, чем у твердых металлов и сплавов. Поэтому наиболее целесообразно использовать полимерные покрытия в паре трения с гладкими твердыми поверхностями.

По данным [2] при трении покрытия на основе высокоэластических материалов по гладким твердым поверхностям в ряде случаев происходит переход от усталостного механизма изнашивания к изнашиванию «скатыванием». Подобное изменение механизма изнашивания обычно возникает при значительном увеличении силы трения, скорости скольжения и температуры. Твердая поверхность увлекает силой трения по ходу своего движения контактирующий участок полимера, деформируя его довольно

сложным образом. Деформация образующегося выступа определяется упругими свойствами полимерной пленки и силой трения. Неоднородность поверхности, образование на ней микродефектов облегчают выход выступа в зазор между поверхностями трения. При этом происходит обрыв выступа или изменение его формы и размеров за счет накопления необратимой деформации и разрастания надрыва поверхности. В результате многократных деформаций и надрывов выступ сворачивается в скатку. Число скаток постепенно увеличивается, возрастает дефектность поверхности, и износ приобретает катастрофический характер. Процессу образования скаток способствует увеличение коэффициента трения. Сопrotивление полимерных покрытий износу посредством скатывания определяется в основном характеристической энергией раздира, модулем упругости и эластичностью материала покрытия. С повышением характеристической энергии раздира сопротивление износу посредством скатывания возрастает.

По условиям протекания процесса изнашивания различают изнашивание при трении по твердым поверхностям, рассмотренное выше, эрозионное, кавитационное, гидроабразивное и газоабразивное изнашивание.

Эрозионное изнашивание возникает при воздействии на покрытие потока жидкости или газа.

Кавитационное изнашивание происходит при воздействии на покрытие потока жидкости в условиях кавитации, т.е. когда в потоке жидкости образуются газовые пузырьки, разрушение которых при контакте с поверхностью покрытия сопровождается гидравлическими ударами.

При наличии в потоке жидкости или газа механических примесей происходит соответственно гидроабразивное и газоабразивное изнашивание.

При встрече под углом  $\alpha_x$  твердой частицы, содержащейся в потоке жидкости или газа, с поверхностью покрытия частица внедряется в поверхностный слой покрытия, проходя некоторый путь трения. Износ покрытия происходит в результате срезания микростружек с поверхности (абразивное изнашивание) или отрыва отдельных частиц материала покрытия вследствие контактной усталости (усталостное изнашивание). Относительная доля каждого из указанных процессов изнашивания определяется физико-механическими свойствами

ми материала покрытия и твердой частицы, твердостью и углом атаки твердой частицы. Угол атаки обуславливает глубину внедрения твердой частицы в поверхностный слой покрытия. По данным [3] тангенциальная составляющая скорости частицы полностью гасится как при увеличении ее внедрения в покрытие, т. е. когда  $f \cdot tg \alpha_k > 1$ , так и при уменьшении внедрения, когда  $1/2 \leq tg \alpha_k \leq 1$ . Тангенциальная составляющая скорости сохраняется при  $f \cdot tg \alpha_k \leq 1/2$ , где  $f$  — коэффициент трения. Зависимость скорости гидроабразивного изнашивания от угла атаки имеет экстремальный характер. Наиболее резко указанная зависимость проявляется у покрытий на основе жестких полимеров. С увеличением угла атаки скорость их изнашивания возрастает, достигая наибольшего значения в области больших углов. У покрытий на основе эластичных материалов с низким модулем упругости деформационная составляющая износа обычно мала и наибольшая скорость изнашивания наблюдается в области малых углов. Увеличение коэффициента трения сдвигает точку экстремума в сторону меньших углов. У большинства покрытий наибольшая скорость изнашивания соответствует углу 40–60°. При определенном угле атаки происходит переход от усталостного механизма изнашивания к абразивному, т. е. к микрорезанию. В этом случае контактные деформации достигают своего критического значения и разрушение происходит за один цикл нагружения. При угле атаки  $\alpha_k = 90^\circ$  на изнашиваемой поверхности покрытия образуется множество лунок — результат отделения частиц материала, обусловленного усталостным разрушением. С уменьшением угла атаки наряду с лунками появляются отдельные риски вследствие микрорезания поверхности твердыми частицами.

Скорость гидроабразивного и газоабразивного изнашивания зависит от толщины покрытия, температуры и химического состава эксплуатационной среды. Их влияние проявляется косвенно через изменение упругопрочностных и фрикционных свойств полимерного слоя.

При увеличении толщины покрытия до определенного значения скорость гидроабразивного и газоабразивного изнашивания снижается вследствие уменьшения влияния твердой поверхности металла и сил адгезии на деформационные свойства полимерного слоя.

Приведенные данные о разнообразных механизмах изнашивания полимерного покрытия в различных эксплуатационных условиях и влиянии

различных факторов на интенсивность или скорость процесса изнашивания убедительно показывают, что сопротивление полимерного покрытия износу определяется не только физико-механическими характеристиками материала покрытия, но и в значительной мере условиями контактного взаимодействия покрытия с сопряженной твердой поверхностью в парах трения или с воздействующим на покрытие потоком жидкости или газа. Это обуславливает необходимость при оценке сопротивления износу разрабатываемого или выбираемого полимерного покрытия конкретного назначения использовать методы контроля, в достаточной мере имитирующие механизм изнашивания покрытия и режимы трения в реальных условиях эксплуатации.

В настоящее время отечественная и зарубежная нормативно-техническая документация, определяющая качество полимерных покрытий различных видов оборудования и сооружений, обязывает разработчиков и потребителей этих покрытий использовать ряд методов контроля сопротивления износу, совершенно не учитывающих специфику процесса изнашивания в каждом конкретном случае.

Например, ГОСТ 20811 предусматривает два метода испытаний:

- определение прочности к истиранию падающим кварцевым песком (метод А);
- определение прочности к истиранию при трении шлифовальной шкуркой (метод Б).

При методе А определяется масса кварцевого песка, необходимого для разрушения покрытия до подложки, установленной под углом 45° к направлению падающей на нее струи песка, вытекающей под действием гравитационной силы из отверстия воронки конической формы.

Прочность покрытия к истиранию  $X$  (Н/м) вычисляется по формуле

$$X = m/\delta,$$

где  $m$  — масса песка, израсходованного на истирание;  $\delta$  — толщина покрытия.

При методе Б определяется уменьшение объема покрытия ( $\text{мм}^3$ ) на площади истирания  $1 \text{ см}^2$  (удельный объемный износ) в результате трения поверхности покрытия движущейся лентой шлифовальной шкурки при заданной нагрузке на образец. Испытания проводят при скорости движения ленты шлифовальной шкурки 1,55 мм/мин и нагрузке на образец 5–20 Н. Применяют шлифовальную шкурку на бумажной основе марки 5Ш-140 (ГОСТ 6465) рулонную с абразивом-элект-

## Комплексный подход. Оптимальные схемы защиты

**Подбор и поставка ЛКМ общего и специального назначения:**

- Цинкнаполненные грунтовки — «холодное цинкование» металла
- Материалы по ржавчине
- Термостойкие лаки, эмали до 600°C
- Атмосферостойкие материалы
- Фасадные эмали
- Декоративные и кузнечные краски
- Универсальный полиуретановый состав УРЕПЛЕН;
- Однослойные защитные материалы марки ПРИМ для различных поверхностей;

**Подбор оборудования для комплектации участка подготовки поверхности:**

- Абразивоструйные напорные установки
- Стационарные камеры струйной очистки
- Дробеметные установки проходного и камерного типа
- Системы сбора и рекуперации абразива

**Подбор оборудования для нанесения защитных покрытий:**

- Окрасочные аппараты с электрическим, дизельным и пневматическим приводом
- Окрасочные аппараты электростатического напыления
- Окрасочные аппараты низкого давления HVLP
- Установки ТЕРМОДИФУЗИОННОГО ЦИНКОВАНИЯ
- Установки ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ

**Подбор приборов для комплектации ОТК и ЦЗЛ:**

- Приборы входного контроля ЛКМ
- Приборы комплексного контроля покрытий
- Дефектоскопы покрытий и сварных швов
- Ультразвуковые толщиномеры
- Эталоны цветов RAL
- ИСО 8501-1:1988 и др.

**ЦЕНТР ЗАЩИТЫ ОТ КОРРОЗИИ**



196128, г. Санкт-Петербург,  
ул. Кузнецовская, 19, оф. 402-А  
т./ф. (812) 369-33-23,  
387-02-10, 368-04-13,  
т. 972-44-27  
e-mail: ego@mail.lanck.net  
www.ego-npp.spb.ru

рокорундом нормальным марки 14А, зернистостью М-40 или ленту абразивную типа ЛНБ (ГОСТ 12439). Шкурку, которая обеспечивает массовый износ контрольной цинковой пластинки в условиях опыта, равный 0,0130 ± 0,0005 г., называют эталонной.

Удельный объемный износ покрытия ( $\text{мм}^3/\text{см}^2$ ) вычисляют по формуле

$$i_v = Km_i 1000 \rho b,$$

где  $K$  — поправочный коэффициент (для эталонной шкурки  $K = 1$ );  $m_i$  — потери массы материала покрытия вследствие износа;  $\rho$  — плотность материала покрытия,  $\text{г}/\text{см}^3$ ;  $l$  — длина истираемой поверхности покрытия,  $\text{см}$ ;  $b$  — номинальная ширина истираемой поверхности покрытия, равная 1,5  $\text{см}$ .

Стандарт ASTM D 969 (США) предусматривает метод испытания покрытия на истирание, аналогичный методу Б по ГОСТу 20811. Согласно стандарта ASTM D 1044 CS-10 (США) показателем сопротивления покрытия истиранию является потеря массы покрытия (г.) вследствие износа в паре трения с абразивным колесом после определенного числа циклов относительного перемещения при нагрузке 1000 г. Из приведенных данных следует, что ГОСТ 20811 и стандарты ASTM D 969 и ASTM D 1044 CS 10 предусматривают испытание полимерного покрытия только на абразивное изнашивание, хотя в большинстве случаев полимерные покрытия используются в условиях усталостного изнашивания. При этом испытания на абразивное изнашивание по методу А ГОСТ 20811 и по стандарту ASTM D 969 осуществляют незакрепленным абразивом, а по методу Б ГОСТ 20811 и по стандарту ASTM D 1044 CS-10 — закрепленным абразивом. Вероятно, разработчики рассмотренных стандартизированных методов испытаний на истирание предполагали имитировать в первом случае механизм изнашивания покрытия при воздействии на него потока жидкости или газа, содержащего твердые частицы, а во втором случае — механизм изнашивания покрытия в паре трения с твердой шероховатой поверхностью. Но подобная имитация в лабораторных условиях процесса абразивного изнашивания покрытия, протекающего в реальных условиях эксплуатации, недопустима, т. к. при этом не учитываются фактические режимы трения, оказывающие, как было показано выше, существенное влияние на механизм и интенсивность (скорость) процесса изнашивания. В частности, ис-

течение песка из воронки под действием гравитационной силы совершенно не имитирует реальные условия контактного взаимодействия покрытия с потоком жидкости, содержащим абразивные частицы, а во многих случаях и газовые пузырьки, обуславливающие кавитационный механизм изнашивания покрытий нефтегазового оборудования и сооружений. Вероятно, разработчики стандартизированных методов испытания покрытий на износ, скорее всего химики-технологи, совершенно не знакомы с основами теории трения и изнашивания конструкционных материалов и вообще с механикой разрушения твердых тел, о чем свидетельствует применяемая ими терминология «прочность при истирании» и т.п. В настоящее время опубликовано достаточно много фундаментальных работ в области «Трибологии». В частности, исследованию процессов гидроабразивного и кавитационного изнашивания конструкционных материалов и имитации этих процессов в лабораторных условиях посвящена работа [4], физические основы процессов абразивного изнашивания конструкционных материалов закрепленным и незакрепленным абразивом и имитация этих процессов в лабораторных условиях достаточно полно рассмотрены в работах [5] и [6].

Очевидно, основной целью испытаний покрытия на сопротивление износу является оценка ожидаемого срока его службы  $\tau_{из}$  в конкретных условиях эксплуатации. Срок службы противокоррозионного полимерного покрытия в условиях изнашивания описывается уравнением:

– в паре трения с более твердой поверхностью

$$\tau_{из} = \Delta\delta / I_h \vartheta, \quad (1)$$

где  $\Delta\delta$  — допускаемое изменение толщины покрытия, при котором оно способно выполнять свое назначение;  $I_h$  — интенсивность изнашивания покрытия;  $\vartheta$  — скорость относительного перемещения соприкасающихся поверхностей;

– при воздействии потока жидкости или газа, содержащего механические примеси

$$\tau_{из} = \frac{\Delta\delta}{\vartheta_{из}} \quad (2)$$

где  $\vartheta_{из}$  — скорость изнашивания покрытия.

При заданном сроке службы покрытия по критерию «время до изнашивания»  $\tau_{из}$  могут быть рассчитаны с

помощью уравнений (1) и (2) допускаемые значения  $[I_h]$  и  $[\vartheta_{из}]$ , т. е.

$$[I_h] = \frac{\Delta\delta}{\vartheta \tau_{из}}; \quad [\vartheta_{из}] = \frac{\Delta\delta}{\tau_{из}}$$

Для обеспечения заданного срока службы покрытия установленные при его контроле фактические значения  $I_h$  или  $\vartheta_{из}$  не должны превышать допускаемые.

Поэтому разработка методов контроля сопротивления покрытия износу, наиболее достоверно имитирующих фактические условия его эксплуатации, позволит получать при выборе покрытия для конкретного объекта объективную оценку ожидаемого срока его службы. В работе [7] автором были предложены подобные методы и, в частности, для контроля сопротивления полимерных покрытий гидроабразивному износу.

При подготовке данной статьи автор стремился еще раз обратить внимание специалистов в области разработки и применения полимерных покрытий для различных видов нефтегазового оборудования и сооружений на несоответствие содержащихся в отечественной и зарубежной нормативно-технической документации показателей качества полимерных покрытий и методов их контроля назначению этих покрытий. Это обуславливает низкую эффективность использования полимерных покрытий в нефтегазовой отрасли при значительных экономических затратах на их применение.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Протасов В.Н. Полимерные покрытия нефтепромыслового оборудования. — М.: Недра. 1994 г.
2. Бартенев Г.М., Зуев Ю.С. Прочность и разрушение высокоэластических материалов. -М.-Л.: Химия, 1964, 387 с.
3. Крагельский И.В., Добычин М.И., Камбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. -М.: Машиностроение. 1984 г.
4. Козырев С.П. Гидроабразивный износ металлов при кавитации. -М.: Машиностроение. 1971 г.
5. Хрущов М.М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание. -М.: Наука. 1970 г.
6. Сорочкин Г.М. Трибология сталей и сплавов. -М.: Недра. 2000 г.
7. Протасов В.Н. Предлагаемые методы и технические средства контроля показателей качества полимерного покрытия наружной и внутренней поверхности нефтегазопроводов. Ж. «Коррозия ТЕРРИТОРИИ НЕФТЕГАЗ», N 1, 2005 г.