

Д.В. Моргунов, В.А. Иванов

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СО СЛОИСТОЙ СРЕДОЙ ПРИ НАНЕСЕНИИ ИЗОЛЯЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ НА НЕФТЕГАЗОПРОВОДЫ

Представлен обзор исследований в области разработки нанокomпозиционных полимерных изоляционных покрытий для нефтегазовых трубопроводов, а также перспективного метода бесконтактного нанесения изоляционного покрытия на нефтегазопроводы с применением магнитного поля. Выявлены основные параметры полученного изоляционного покрытия, заявлено направление дальнейших исследований.

Изоляционный, композиционный, материал, полимер, технология, нанесение, магнитное поле.

Функционирование магистральных и нефтегазопромысловых трубопроводов происходит в жестких условиях, поскольку в зависимости от назначения они подвержены различным нагрузкам (внутреннему давлению, осевым растягивающим или сжимающим напряжениям, давлению грунта засыпки и подвижных средств, перепадам температур). Основные причины аварий на промысловых трубопроводах связаны с внутренней коррозией, на магистральных — с внешней.

Одно из направлений повышения надежности трубопроводов — внедрение новых изоляционных материалов и современных технологий их нанесения. В последние годы для повышения прочностных свойств и износостойкости полимерных материалов и покрытий применяют их армирование наноструктурными наполнителями.

С целью повышения надежности и срока эксплуатации трубопроводов необходимо решить задачу создания на основе полимера покрытия, востребованного на рынке, превосходящего современное заводское по ряду технологических показателей:

- повышенные на десятки процентов защитные и теплотехнические свойства;
- в разы меньшая влагоемкость;
- высокие прочность и износостойкость;
- расширенный температурный диапазон эксплуатации;
- сниженный за счет включения в полимер наполнителя до 10 % удельный расход сырья.

Востребованность таких покрытий обусловлена огромным потенциальным рынком сбыта новой продукции, в том числе нефтяной, газовой, нефтегазоперерабатывающей, химической и энергетической отраслей, и ужесточающимися требованиями к качеству защитных покрытий трубопроводов, ежегодная потребность в которых только нефтяной промышленности составляет выше 80 тыс. км.

Эксперты считают, что создание новых материалов и методов их нанесения на наружную поверхность трубопроводов поднимут на новый уровень качество изделий из труб с антикоррозионным покрытием. Это повысит их конкурентоспособность, увеличит срок эксплуатации и изменит физико-химиче-

ские свойства покрытий и принципы их нанесения на трубопроводы. Это обстоятельство немаловажно в связи со строительством и эксплуатацией нефтегазопроводов в сложных климатических условиях Крайнего Севера, пустынь и территорий с большой амплитудой и резкими колебаниями температур. Кроме того, созданное с использованием кардинально иных подходов антикоррозионное покрытие нового типа ориентировано на соответствие международным экологическим нормам, что в значительной мере обеспечит конкурентоспособность продукции трубных предприятий России на внутреннем и международном рынке.

Все это позволяет сделать вывод о том, что актуальность, востребованность и перспективность разработки несомненна.

Из анализа ряда публикаций по наноматериалам следует, что внедрение в структуру полимеров ферромагнетиков (как наполнителя) способно:

- увеличить теплостойкость;
- придать антистатические свойства;
- улучшить механические характеристики (повысить прочность при растяжении и на разрыв, увеличить модуль упругости и предельное растяжение, износостойкость);
- увеличить адгезионную прочность и расширить температурный диапазон применения (от -60 до 250 °С);
- обеспечить устойчивость к воздействию агрессивных рабочих сред.

Во многих публикациях сообщалось о весьма ощутимых эффектах от введения нанотрубок в полимерные волокна. Так, например, добавление фуллеренов приводит к повышению механических свойств, радиационной стойкости, стабильности полимеров при «жесткой» эксплуатации.

Другим важным вопросом при решении поставленной задачи является разработка метода нанесения изоляционного материала на наружную поверхность трубопроводов. В настоящее время все разработки, направленные на совершенствование технологий нанесения изоляционных покрытий на трубопроводы, сводятся к частичной модернизации существующих установок и оборудования, что, судя по результатам промышленного внедрения, решает лишь малую часть второстепенных, но не основную задачу — обеспечение возможности всесезонного нанесения экологически чистого изоляционного покрытия на трубопроводы в различных природно-климатических условиях с минимизацией сопутствующих работ, таких как подготовительные, земляные и т.п.

За основное направление исследований было принято изучение влияния магнитных полей на указанные выше характеристики материала и способ его нанесения.

В результате патентного поиска и анализа литературы было принято решение проводить исследования в области разработки метода нанесения изоляционного покрытия на трубопроводы с применением магнитного поля.

Все вещества по отношению к магнитному полю можно разделить на три большие группы: диа-, пара- и ферромагнетики. Последние характеризуются способностью к самопроизвольной намагниченности, причем относительная магнитная восприимчивость (коэффициент пропорциональности между намагниченностью вещества и напряженностью внешнего магнитного поля) достигает значения 10⁵. По природе магнетизма выделяют две группы — собственно ферромагнетики и антиферромагнетики. Ферромагнетики характеризуются однонаправленным упорядоченным расположением магнитных моментов неспаренных электронов, принадлежащих взаимодействующим атомам, а антиферромагнетики имеют две или более магнитные подрешетки, каждая из

которых образована ионами, занимающими одни и те же кристаллографические позиции. Именно ферромагнетики были взяты в качестве вещества, добавляемого в полимер, при проведении дальнейших исследований.

Большой интерес представляют работы по получению композиционных материалов и их составляющих (пигментов и связующих), обладающих магнитными свойствами. Преимущества составов, описанных в этих работах: упрощенность технологии приготовления, высокая коррозионная стойкость, высокая стабильность магнитных свойств, высококачественные защитные свойства покрытий.

Решение поставленной задачи велось параллельно с исследованиями антикоррозионного покрытия, которое должно отвечать всем требованиям нормативно-технической документации.

На формирование физико-химических свойств композиционного изоляционного материала значительное влияние оказывает его состав, т.е. вид и количество компонентов, вводимых в исходный материал-матрицу, которые обладают определенными магнитными и изоляционными характеристиками.

Широкий спектр вновь созданных композитов, однако, отличается от традиционных материалов, применяемых в широком строительстве, не только по составу, но и по внутреннему строению — структуре, которая, как показали исследования, определяет его новые качества.

При создании оптимальных и рациональных структур конгломератов с улучшенными изоляционными свойствами, а также свойствами намагничивания необходимо определить влияние структурного фактора на их магнитные и диэлектрические характеристики.

Основными параметрами, которые характеризуют структурный фактор композитов, являются: вид вяжущего (материал-матрица) и добавок; взаимосвязь физико-механических свойств матрицы и заполнителей; количественные соотношения между материалом-матрицей и компонентами в общем объеме смеси.

Для достоверного определения магнитных и диэлектрических свойств композиционных материалов необходимо дать оценку их структуры. Заполнители, входящие в состав композита (полимерная мастика, ферромагнетик, отвердитель), имеют различный диаметр частиц, поэтому для упрощения расчета числовую величину коэффициента упаковки можно выразить как отношение объема вяжущего к объему заполняющей части, т.е.

$$K_y = \frac{V_k}{V_m}, \quad (1)$$

где V_m — объем полимерной мастики; V_k — объем компонентов.

Подобно плотной, компактной упаковке частиц в микроструктуре вяжущего вещества, грубодисперсные частицы добавки подбираются с наименьшим объемом межзерновых пустот для создания оптимальных структур композиционного материала.

Исследования показали, что при $K_y \leq 0,08$ структура материала является оптимальной, а по мере увеличения $K_y > 0,1$ ухудшается контактирование и взаимосвязь частиц. Если частицы материала-матрицы и заполнителей шарообразной формы и одного диаметра, то для оптимальной структуры максимальное количество частиц заполнителя в конгломерате составляет 6 %, что соответствует $K_y = 0,07$. В случае несоизмеримости частиц вяжущего и добавок по своим геометрическим размерам (длина и диаметр), K_y не должен быть

больше 0,08. По мере увеличения дисперсности заполнителя его количество в общем объеме композита меняется, и тогда коэффициент упаковки в общем виде вычисляется по формуле

$$K_y = \frac{\rho_M \cdot V_M - \rho_K \cdot V_K}{\rho_M \cdot V_M}, \quad (2)$$

где ρ_K , V_K , ρ_M , V_M — плотность и объем компонента и материала-матрицы соответственно.

Полученный метод расчета позволяет выбрать наилучшую плотность упаковки частиц в макроструктуре композиционного материала и, как следствие, определить оптимальную структуру материала с заранее заданными свойствами.

До проведения экспериментов было выполнено обоснование магнитного воздействия на частицы изоляционного материала с включениями ферромагнетиков в процессе нанесения на поверхность трубопровода.

Согласно внешнему подобию между электрическими и механическими процессами можно получить закон сохранения энергии в следующем виде:

$$\frac{mv^2}{2} = K \frac{LI^2}{2}, \quad (3)$$

где m — масса, v — скорость, L — индуктивность, I — сила тока, K — коэффициент подобия.

Для магнитной цепи с однородным ферромагнитным магнитопроводом приняли расчетную формулу закона плотного тока (4)

$$Iw = HI = \frac{B}{\mu} l, \quad (4)$$

где H — напряженность магнитного поля, l — длина средней линии магнитной линии (магнитной линии в воздушном зазоре), B — магнитная индукция (плотность магнитного поля), μ — магнитная проницаемость воздушного зазора (магнитная проницаемость материала).

Из уравнения магнитного потока определили магнитную индукцию (5):

$$\Phi = BS = LI, \quad (5)$$

где Φ — поток магнитной индукции через площадь S , S — площадь сечения магнитопровода.

В результате вывели из формулы (5) B и получили (6):

$$B = \frac{LI}{S}. \quad (6)$$

Подставив вместо магнитной индукции в формуле (4) значение величины магнитной индукции, найденной по формуле (6), получили

$$Iw = \frac{LI}{S\mu} l. \quad (7)$$

Сократив в обеих частях уравнения (7) силу тока I , получили выражение (8):

$$w = \frac{L}{S\mu} l. \quad (8)$$

Из формулы (8) определили индуктивность L (9):

$$L = \frac{wS\mu}{l}. \quad (9)$$

Определенное уравнением (9) значение индуктивности L подставили в уравнение (3) вместо индуктивности L :

$$\frac{mv^2}{2} = K \frac{wS\mu}{2l} I^2, \quad (10)$$

после сокращения выражения (10) получили

$$mv^2 = KwS\mu I^2. \quad (11)$$

Согласно уравнению

$$v^2 = 2 \cdot al, \quad (12)$$

где v — скорость, a — ускорение, l — расстояние.

Значение скорости v из уравнения (12) подставили в уравнение (10) и получили

$$\frac{2 mal}{2} = K \frac{wS\mu}{2l} I^2. \quad (13)$$

После проведения сокращений и преобразований в формуле (13), а также учитывая, что $ma = F$, получили расчетную формулу (14):

$$F = K \frac{wS\mu}{2} \left(\frac{l}{l} \right)^2. \quad (14)$$

Вышеуказанные вычисления и определение силы F были необходимы для того, чтобы определить необходимые параметры системы для получения требуемых параметров установки для нанесения изоляционного покрытия с включениями ферромагнетиков на поверхность трубопровода.

На начальной стадии исследований был проделан ряд экспериментов по выяснению возможности создания указанной выше технологии и материала. Эксперименты заключались в добавлении в полимерную массу различных компонентов, обладающих свойствами ферромагнетика.

Труба с нанесенным на верхнюю образующую полученным изоляционным материалом помещалась в постоянное магнитное поле на непродолжительное время (10–15 сек), после чего наблюдалось неравномерное нанесение изоляционного покрытия, присутствовали расслоения, структура самого изоляционного материала была неоднородной. Это было обусловлено довольно высокой консистенцией полимерной мастики, а также малым количеством полюсов в излучателе магнитного поля.

В конечном варианте консистенция изоляционного материала была доведена до такой, при которой наблюдалось равномерное нанесение антикоррозионного покрытия на трубопровод, а количество полюсов приведено к значению, достаточному для получения положительных результатов эксперимента. Итоги экспериментов подтвердили правильность использования включений ферромагнетиков в структуру изоляционного материала (полимерной массы) как составляющей, необходимой для нанесения изоляционного материала на наружную поверхность трубопровода бесконтактным методом при помощи магнитного поля.

При выборе данного направления исследований был изучен ряд публикаций, в которых отмечалось, что при взаимодействии с влажной средой некоторые ферромагнетики теряют свойства намагничивания, что положительно влияет на результаты экспериментов, так как в некоторых случаях прокладки трубопроводов возможно применение данного покрытия без исключения из него намагничиваемых частиц вследствие постоянной эксплуатации трубопроводов во влажной среде.

В настоящий момент проводятся исследования, направленные на выявление возможных вариантов извлечения ферромагнетика из изоляционного покрытия, уже нанесенного на наружную поверхность трубопроводов, а также замены ферромагнетиков другими веществами, в извлечении которых не будет необходимости. В данном направлении также уже получены положительные результаты.

Установлено, что прочность образцов с включениями ферромагнетика при растяжении повышается, но при этом в два раза снижается относительное удлинение (рис.).

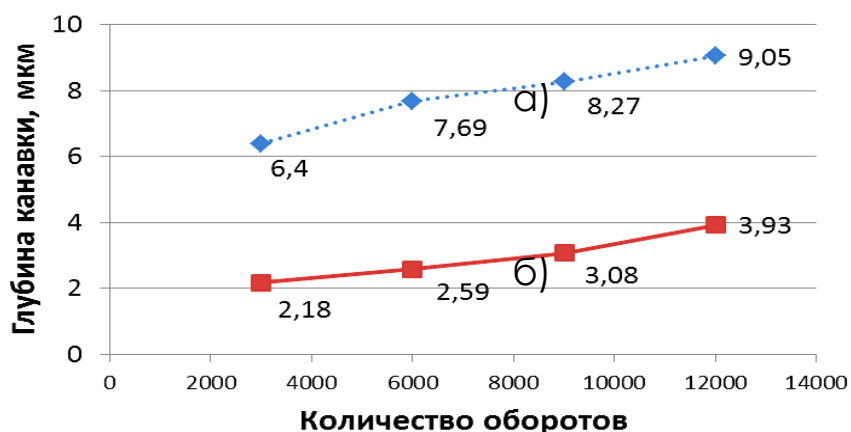


Рис. Зависимость прочности от удлинения:
а) без наполнителя; б) с наполнителем из ФНЧ

Отмечено, что значительное увеличение объемной доли наполнителя приводит:

- к снижению прочности полимерных материалов;
- увеличению тенденции к хрупкому разрушению.

Установлено, что введение ферромагнитных наночастиц (ФНЧ) в полимерную массу задерживает начало изнашивания полимерного композиционного материала, обуславливает повышение его износостойкости почти в два раза и значительно увеличивает адгезионную прочность (до 4).

Введение ферромагнитных наночастиц в полимерную массу меняет механические характеристики полимерных материалов (табл.).

Обнаружено, что максимальную стойкость имеют покрытия с добавкой до 10 об.% ФНЧ: не обнаружено разрушения материала покрытия, сохранилась высокая адгезия к стали. Покрытия с большим содержанием добавок (15 об.%) частично или полностью отслаиваются.

Предел прочности и удлинение при разрыве чистого полимера и модифицированного ФНЧ

Материал	Предел прочности, МПа	Удлинение при разрыве, %
Чистый исходный полимер без добавок	25	520
Полимер с добавкой ФНЧ	32	295

Испытания на химическую стойкость проводили на образцах с покрытием, которые погружали в емкость со щелочной средой (раствор NaOH 140 г/л) и помещали в термический шкаф. Длительность испытаний составила 12 ч; диапазон температур 10–80 °С.

По итогам проведенных исследований можно утверждать, что данное направление перспективно и жизнеспособно, хотя для получения окончательных результатов требуются эксперименты на промышленных площадках.

Выводы

1. Новый композиционный материал на основе полимера, модифицированного ФНЧ, может быть получен путем смешивания компонентов в строго определенных пропорциях. Значение имеют условия проведения самого процесса смешивания и адгезия внутри полимеров.

2. Проведенные работы показывают, что добавление ФНЧ — эффективный способ улучшения некоторых физико-механических характеристик материалов на основе полимера (прочность и износостойкость повышается в несколько раз, коэффициент трения снижается). Помимо улучшения свойств, становится возможным нанесение изоляционного покрытия на трубопровод при помощи магнитного поля.

3. Важным моментом является качество композиционного материала, которое сильно зависит от качества исходных компонентов — полимера и ФНЧ. Достижение идеальных параметров — вопрос прежде всего стоимости.

4. Установлено, что для достижения других требуемых свойств (прочности и износостойкости) оптимальное количество наполнителя не должно превышать 5–8 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Завизенов К.В.* Обзор некоторых аспектов производства труб для нефтяной промышленности // Территория Нефтегаз. 2004. № 10. 25 с.
2. *Низьев С.Г.* Защита трубопроводов от коррозии с использованием современных изоляционных покрытий заводского и трассового нанесения // Территория Нефтегаз. 2004. № 6. С. 3.
3. *Панин С.В., Панин В.Е., Овечкин Б.Б. и др.* Научные основы формирования высокопрочных и износостойких полимерных покрытий с наноструктурными наполнителями // Физ. мезомеханика. 2006. № 9. С. 141–144.
4. *Раков Э.Г.* Волокна с углеродными нанотрубками // Рынок легкой промышленности. 2007. № 48.
5. *Фаизов Р.Б.* Актуальность и экономические аспекты проблемы коррозии и защиты металлических сооружений // Нефть, газ, промышленность. 2004. № 3 (8).

D.V. Morgunov, V.A. Ivanov

**INVESTIGATION OF INTERACTION MECHANISM BETWEEN MAGNETIC FIELD
AND LAYERED MEDIUM UNDER INSULATED COATING OF OIL AND GAS PIPELINES**

The article gives a review of investigations conducted by the authors in the field of developing nano-composite polymer insulated coatings for oil and gas pipelines, and promising method of noncontact insulated coating of oil and gas pipelines using magnetic field. Subject to identification being basic parameters of the obtained insulated coating, stating direction of further investigations.

Insulated, composite material, polymer, technology, coating, magnetic field.