

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ,
ПОДВЕРЖЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЮ ИЗОЛЯЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ НЕФТЕПОЛИМЕРА**

Гумеров К.М., Ямалеев К.М., Агапчев В.И.

ГУП «ИПТЭР»

Черкасов Н.М., Гладких И.Ф.

НТЦ «Поиск»

Приводятся результаты экспериментальных исследований механических свойств стальных образцов, покрытых изоляционными материалами на основе нефтеполимера «Асмола». Установлено, что изоляционные материалы на основе нефтеполимера «Асмола» могут быть рекомендованы для переизоляции участков магистральных газопроводов, потенциально опасных с точки зрения развития стресс-коррозии.

Одной из наиболее острых проблем в системе магистральных газопроводов (МГ) является защита от стресс-коррозии. Для того, чтобы обеспечить защиту от стресс-коррозии, необходимо исключить причины развития этого процесса. По нашему мнению, совпадающему с мнением большинства ученых, стресс-коррозия металла труб газопроводов происходит при сочетании следующих трех условий:

- высокие механические напряжения в стене труб,
- доступ грунтовой воды к поверхности металла труб,
- наличие источника атомарного водорода.

На МГ высокие механические напряжения создаются высокими рабочими давлениями (в большинстве случаев 7,0 – 7,5 МПа). Доступ грунтовой воды “обеспечивает” пленочная изоляция (которая содержит

гофры и повреждения, а со временем быстро теряет адгезию и отслаивается от защищаемой поверхности трубы). Одним из универсальных источников атомарного водорода является грунтовая вода, которая является электролитом. Катионы водорода, которые содержатся в грунтовой воде, восстанавливаются до состояния атомарного водорода на поверхности трубопровода, имеющего отрицательный потенциал от системы электрохимической защиты. Далее атомарный водород вследствие своей чрезвычайной подвижности проникает в металл, вступает в различные объединения внутри металла, в результате приводит к охрупчиванию металла и облегчает его растрескивание под действием высоких механических напряжений. Часть водорода остается под пленкой в виде пузырей и приводит к дальнейшему отслаиванию покрытия. Это также ускоряет стресс-коррозию трубопроводов.

Для исключения стресс-коррозии достаточно “выключить” хотя бы одно из указанных условий. Наиболее приемлемым с практической точки зрения является исключение доступа грунтовой воды к поверхности металла труб. Для этого необходимо не допускать дефекты изоляции, и самое главное, обеспечить хорошую адгезию в течение длительного времени (пока МГ находится в эксплуатации). Исключить дефекты изоляции возможно технологическими приемами (технологическая дисциплина и контроль качества), обеспечить высокую адгезию – только подбором или разработкой соответствующих изоляционных материалов.

Адгезия изоляционных материалов к поверхности металла обеспечивается за счет взаимодействия молекул металла и изоляционного материала. От силы этого взаимодействия зависит величина адгезии.

Известны две основные силы взаимодействия молекул: физические и химические. Физическое взаимодействие молекул происходит за счет “деформирования” внешней электронной оболочки без образования новых молекул. Химическое взаимодействие происходит за счет кардинального

изменения внешних электронных оболочек и образования новых молекул на поверхности труб. Поэтому физическое взаимодействие часто называют “слабым”, химическое – “сильным”.

Адгезия к металлу труб всех до сих пор используемых изоляционных материалов формируется за счет физического взаимодействия молекул. При этом получены неплохие результаты, однако, по-видимому, в этом направлении достигнут предел.

В НТЦ “Поиск” многие годы велись разработки новых изоляционных материалов и в результате исследований синтезирован нефтеполимер “Асмол”, который обладает высокой адгезией к металлу труб за счет использования химического взаимодействия молекул. Молекулы “Асмола” содержат функциональные группы, которые взаимодействуют с поверхностными атомами-ионами металла аналогично анионам кислотных групп. При этом на поверхности металла образуется защитный слой из полимолекул “Асмола”, соединенных с поверхностными молекулами металла с помощью функциональных групп. Этот слой становится барьером для грунтовой воды. На формирование с течением времени защитный слой становится более плотным за счет процессов, определяющих подвижность молекул (катодный потенциал, температурные изменения, водопоглощение).

Всевозможные исследования “Асмола” и других изоляционных материалов на его основе в лабораторных и трассовых условиях показывают, что эти материалы обладают рядом уникальных положительных качеств, которые весьма кстати при замене изоляции магистральных газопроводов, находящихся в эксплуатации длительное время. Более широкому использованию этих изоляционных материалов препятствует повышенная кислотность самого “Асмола” (рН порядка 5,5). Хотя разработчикам совершенно понятно происхождение такого значения рН (кислотными свойствами обладают связанные функциональные группы полимолекул “Асмола”, за счет которых и обеспечивается высокая адгезия), есть мнение

среди потенциальных потребителей, что “Асмол” может снизить прочностные свойства труб из-за химической реакции, протекающей на поверхности труб. Чтобы поставить точку на этом вопросе, провели исследования свойств стальных образцов, выдержанных длительное время в растворе “Асмола”. Испытания образцов проводили на циклический изгиб и статическое растяжение.

1. При разработке методики испытаний на циклический изгиб учитывали, что наибольшие изменения свойств стали могут происходить на поверхности, а также то, что любые изменения механических свойств металла наиболее ярко выражаются при циклических нагрузках. Для испытаний изготовили образцы с размерами, указанными на рисунке 1, из малоуглеродистой листовой стали марки 08, по химическому составу и структуре близкой к трубопроводным сталям.

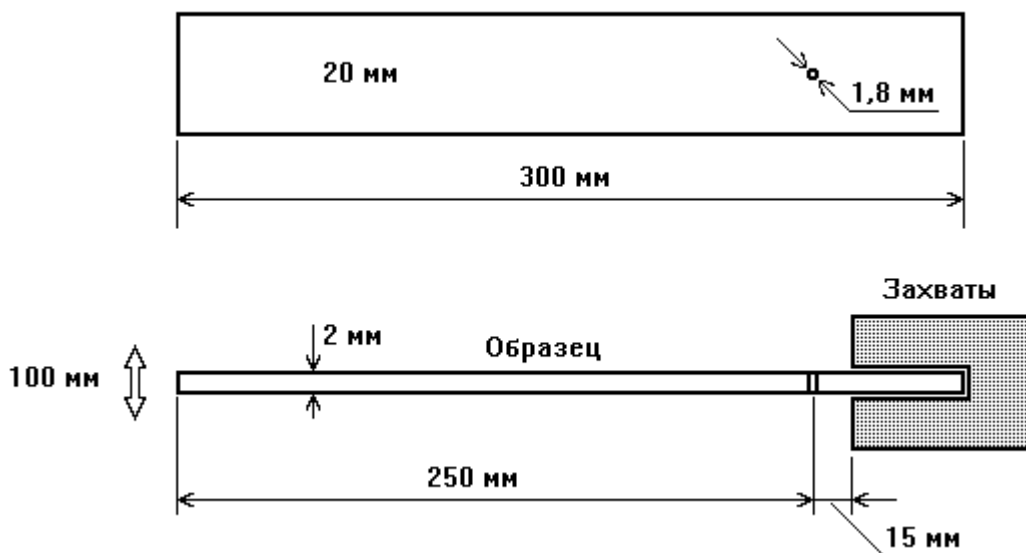


Рисунок 1 – Вид и размеры плоских образцов, схема испытаний

Испытания проводили по схеме циклического консольного изгиба. При этом один конец образца находился в зажатом состоянии с помощью захватного устройства, другой конец совершал циклическое движение с размахом 100 мм. Для ускорения зарождения трещины на образцах выполняли отверстие диаметром 1,8 мм, которое являлось концентратором напряжений. При испытаниях следили за зарождением трещин на концентраторе напряжений (отверстии) и записывали числа циклов в определенные моменты испытаний.

Испытывали три серии по пять образцов. Первая серия – образцы в исходном состоянии (до взаимодействия с “Асмолом”), вторая – такие же образцы после выдержки их в “Асмоле” в течение 33 суток, третья - образцы после выдержки их в “Асмоле” в течение 60 суток. Результаты испытаний приведены в таблицах 1а, 1б, 1в. В таблице 2 приведены результаты статистической обработки полученных результатов.

Таблица 1а – Динамика зарождения и развития трещин при испытании образцов в исходном состоянии, выраженная в числах циклов

| Этапы развития трещины | Номера образцов первой серии | | | | |
|-------------------------------|------------------------------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| До появления трещин (по 1 мм) | 3008 | 3378 | 3339 | 2153 | 3035 |
| От появления до 5 мм | 683 | 688 | 719 | 1144 | 620 |
| От 5 мм до 6 мм | 283 | 478 | 504 | 441 | 530 |
| От 6 мм до 7 мм | 251 | 420 | 200 | 415 | 476 |
| От 7 мм до 8 мм | 307 | 252 | 378 | 436 | 286 |
| От 8 мм до 9 мм | 220 | 168 | 221 | 142 | 231 |
| От 9 мм до 10 мм | 90 | 95 | 215 | 247 | 231 |
| От 10 мм до 11 мм | 88 | 70 | 95 | 58 | 95 |
| От 11 мм до 12 мм | 105 | 80 | 137 | 110 | 151 |
| От 12 мм до разрушения | 134 | 126 | 116 | 189 | 387 |
| Полное число циклов | 5169 | 5755 | 5924 | 5335 | 6042 |

Таблица 1б – Динамика зарождения и развития трещин при испытании образцов после выдержки 33 сутки в растворе “Асмола”, выраженная в числах циклов

| Этапы развития трещины | Номера образцов второй серии | | | | |
|-------------------------------|------------------------------|------|------|------|------|
| | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| До появления трещин (по 1 мм) | 2741 | 2809 | 2651 | 3308 | 3066 |
| От появления до 5 мм | 567 | 672 | 913 | 725 | 326 |
| От 5 мм до 6 мм | 252 | 598 | 525 | 315 | 210 |
| От 6 мм до 7 мм | 399 | 221 | 273 | 409 | 378 |
| От 7 мм до 8 мм | 546 | 189 | 599 | 284 | 242 |
| От 8 мм до 9 мм | 252 | 399 | 105 | 315 | 525 |
| От 9 мм до 10 мм | 205 | 252 | 116 | 147 | 357 |
| От 10 мм до 11 мм | 105 | 84 | 147 | 84 | 420 |
| От 11 мм до 12 мм | 74 | 137 | 136 | 74 | 461 |
| От 12 мм до разрушения | 158 | 200 | 126 | 210 | 105 |
| Полное число циклов | 5299 | 5561 | 5591 | 5871 | 6090 |

Таблица 1в – Динамика зарождения и развития трещин при испытании образцов после выдержки 60 суток в растворе “Асмола”, выраженная в числах циклов

| Этапы развития трещины | Номера образцов третьей серии | | | | |
|-------------------------------|-------------------------------|------|------|------|------|
| | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| До появления трещин (по 1 мм) | 2659 | 2611 | 2788 | 2894 | 3275 |
| От появления до 5 мм | 1222 | 812 | 719 | 808 | 463 |
| От 5 мм до 6 мм | 483 | 501 | 368 | 530 | 599 |
| От 6 мм до 7 мм | 366 | 430 | 635 | 850 | 420 |
| От 7 мм до 8 мм | 567 | 438 | 415 | 147 | 483 |
| От 8 мм до 9 мм | 136 | 356 | 367 | 178 | 284 |
| От 9 мм до 10 мм | 141 | 248 | 165 | 273 | 252 |
| От 10 мм до 11 мм | 125 | 170 | 220 | 105 | 115 |
| От 11 мм до 12 мм | 99 | 102 | 204 | 147 | 62 |
| От 12 мм до разрушения | 122 | 106 | 125 | 189 | 178 |
| Полное число циклов | 5890 | 5774 | 6006 | 6121 | 6131 |

Таблица 2 – Математические ожидания (число циклов) и разбросы (проценты) результатов испытаний серий образцов

| Этапы развития трещины | Исходные образцы | Выдержанные в “Асмоле” 33 сутки | Выдержанные в “Асмоле” 60 суток |
|-------------------------------|------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| До появления трещин (по 1 мм) | 2983 (16,5 %) | 2915 (9,2 %) | 2845 (9,3 %) |
| От появления до 5 мм | 771 (27,5 %) | 641 (33,7 %) | 805 (33,9 %) |
| От 5 мм до 6 мм | 447 (21,8 %) | 380 (45,2 %) | 496 (17,0 %) |
| От 6 мм до 7 мм | 352 (34,0 %) | 336 (25,0 %) | 534 (38,9 %) |
| От 7 мм до 8 мм | 332 (22,4 %) | 372 (50,2 %) | 410 (38,6 %) |
| От 8 мм до 9 мм | 196 (20,0 %) | 319 (49,3 %) | 264 (39,4 %) |
| От 9 мм до 10 мм | 176 (43,7 %) | 215 (44,0 %) | 215 (27,2 %) |
| От 10 мм до 11 мм | 81 (20,3 %) | 168 (85,2 %) | 147 (32,5 %) |
| От 11 мм до 12 мм | 117 (23,9 %) | 176 (91,9 %) | 123 (44,4 %) |
| От 12 мм до разрушения | 190 (59,6 %) | 160 (29,5 %) | 144 (25,7 %) |
| Полное число циклов | 5645 (6,7 %) | 5682 (5,4 %) | 5984 (2,6 %) |

В качестве показателя разброса результатов выбрали отношение дисперсии к математическому ожиданию, выраженное в процентах.

В процессе испытаний наблюдали следующие особенности:

- Разброс результатов оказался не таким большим, как ожидалось вначале (обычно для усталостных испытаний разброс результатов по числу циклов может быть до 10 раз).
- Рост трещин происходит неравномерно, скачками. Периоды накопления микроповреждений чередуются периодами более быстрого продвижения магистральной трещины. Поэтому разброс скоростей развития трещины на разных этапах значительно больше.
- Фронт трещины часто отклоняется от перпендикуляра к поверхности образца. Поэтому длина трещины, измеренная на одной и на другой поверхностях образца может быть различной.
- Моменту появления трещины предшествует локальное потемнение поверхности металла из-за пластических деформаций и накопления микротрещин.

Для сравнения результатов испытаний трёх серий образцов целесообразно выбрать следующие количественные показатели циклической прочности:

N_3 – число циклов до появления (зарождения) видимых лупой трещин размером по 1 мм в обе стороны от отверстия;

N_p – число циклов, соответствующих росту трещины от 5 мм до 10 мм (область, где влияние краевых эффектов несильное);

N_{II} – полное число циклов до разрушения образца.

Математические ожидания выбранных показателей циклической прочности образцов в пределах каждой серии и отличие этих величин, относящихся к разным сериям, приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Сравнительный анализ динамики разрушения образцов исходных и после выдержки в “Асмоле”

| Показатели | Математические ожидания (циклы) и разбросы (%) результатов испытаний разных серий образцов | | | Отклонение математических ожиданий по отношению к исходной серии |
|-----------------|--|-------------------------|-------------------------|--|
| | Исходные образцы | После выдержки 33 сутки | После выдержки 60 суток | |
| N_3 , цикл | 2983 (16,5 %) | 2915 (9,2 %) | 2845 (9,5 %) | (-4,6...-2,3) % |
| N_p , цикл | 1503 (15,8 %) | 1623 (5,6 %) | 1920 (7,7 %) | (+8,0...+27,7) % |
| N_{II} , цикл | 5645 (6,7 %) | 5682 (5,4 %) | 5984 (2,6 %) | (+0,6...+6,0) % |

Как видно из таблицы 3, результаты испытаний разных серий образцов близки и находятся в пределах разбросов, соответствующих каждой из серий.

После выдержки образцов в “Асмоле” произошло следующее кажущееся изменение: трещины быстрее стали зарождаться (N_3 стало ниже до 4 %) и медленнее развиваться (N_p увеличилось до 27 %). Но это действительно кажущийся эффект, связанный с разбросом данных, соответствующих этапу роста трещин в пределах каждой серии. Как видно из таблицы 2, этот разброс внутри серий достигает до 91 %.

Суммарная циклическая прочность образцов N_{II} после выдержки в “Асмоле” не снизилась.

2. При разработке методики испытаний на статическое растяжение полагали, что изменения свойств стали могут происходить только на его поверхности. При этом чем тоньше будут образцы, тем более заметным будет влияние “Асмола” на механические свойства металла. Поэтому для испытаний выбрали стальную фольгу толщиной 0,06 мм. Форма и размеры образцов показаны на рисунке 2. Результаты испытаний приведены в таблице 4.

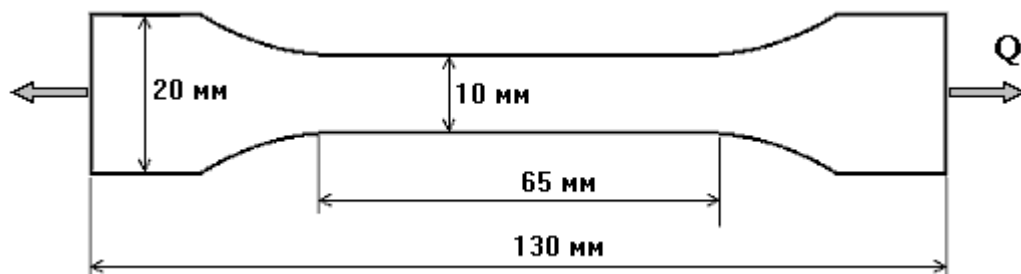


Рисунок 2 – Образец для испытаний на статическое растяжение

Таблица 4 – Результаты испытаний образцов из фольги на статическое растяжение

| | Исходные образцы | Образцы после выдержки в “Асмоле” 33 сутки |
|---|------------------|--|
| Разрушающие нагрузки Q , Н | 206,6 | 196,8 |
| | 226,2 | 216,4 |
| | 189,8 | 222,0 |
| | 203,1 | 201,0 |
| Математическое ожидание Q_{CP} , Н | 206,42 | 209,05 |
| Дисперсия σ_Q , Н | 15,0 | 12,1 |
| Разброс результатов R_Q , % | 7,3 % | 5,5 % |
| Изменение математического ожидания после выдержки в “Асмоле” составляет + 1,2 % | | |

Результаты испытания на растяжение показывают, что прочность стальной фольги после выдержки в “Асмоле” не изменилась. Изменение математического ожидания разрушающей нагрузки после воздействия “Асмола” составляет 1,2 %, что значительно меньше разброса результатов испытаний в каждой из испытанных серий. Поэтому в данном нет основания утверждать, что произошло изменение механических свойств стальной фольги после выдержки образцов в “Асмоле”.

Таким образом, по результатам двух видов испытаний можно сделать следующие выводы:

1. Изоляционные материалы на основе “Асмола”, не приводят к изменению механических свойств металла труб, хотя и являются химически активными по отношению к его поверхности, что и обеспечивает их высокую адгезию в течение длительного срока эксплуатации подземных стальных трубопроводов.

2. Благодаря высокой адгезии к поверхности трубопровода, основанной на химическом взаимодействии с металлом, а также высокой технологичности при работах в трассовых условиях, изоляционные материалы на основе “Асмола” могут быть рекомендованы для переизоляции участков магистральных газопроводов, потенциально опасных с точки зрения развития стресс-коррозии.