

Двухслойные ленты для ремонта локальных повреждений защитных покрытий трубопроводов

Л.Н. Шкаранута, Л.Л. Митрохина, И.П. Морозова

Институт биоорганической химии и нефтехимии НАН Украины,
Украина, 02160 Киев, Харьковское шоссе, 50; тел.: (044) 559-66-47

Разработаны научные основы промышленного получения материалов для ремонта локальных повреждений трубопроводов. Проанализированы закономерности нестационарных режимов охлаждения исходных полимеров, предложены соотношения, связывающие геометрию двухслойной ленты, расходы ингредиентов, скорость вытяжки и величину участка стабильного формирования исходного рукава ленты, найдены оценки диапазона рациональных величин скорости вытяжки. В промышленных условиях наработаны ремонтные материалы и устранены локальные повреждения изоляции 280 погонных метров труб диаметром 219 мм и 530 мм. Использование оригинальных материалов позволяет отказаться от разогрева тела трубы до 110–130 °С, существенно сокращает время ремонта и дает возможность восстановить характеристики поврежденных участков защитного покрытия до уровня требований ДСТУ 4219-2003.

В ходе нанесения защитного покрытия, транспортировки, строительно-монтажных работ, процесса эксплуатации часто имеют место локальные повреждения изоляции труб. Особую актуальность имеет выборочный ремонт изоляции действующих трубопроводов без прекращения транспорта продуктов. В ряду известных методов ремонта [1, 2] следует выделить способ [3], исключающий потребность в разогреве тела трубы до 110–130 °С. Способ сводится к последовательному нанесению на поврежденный участок изоляции трубопровода оригинальной грунтовки ГТК-09 [4] при 10–30 °С, заполнению, в случае сквозного повреждения, каверны адгезивом КРА-09 [4, 5], наложению двухслойной ленты (адгезив–ПЭВД марки 153-10К) и, наконец, ее усадки при температуре 110–120 °С. Получение двухслойной ленты с умеренной усадкой, комплекта ремонтных материалов является определяющим для реализации способа [3].

К числу управляющих воздействий при формировании двухслойной ленты следует отнести степень раздува, скорость вытяжки рукава, массовый расход материалов основы и адгезива ленты, условия отверждения полимеров. Были предложены соотношения, связывающие геометрию ленты, скорость ее вытяжки и расходы ингредиентов. Так, принимая, что D_1 и D_3 диаметры наружной и внутренней стороны рукава, ρ_1 – плотность полиэтилена, δ_1 – толщина его слоя, расход полиэтилена, как функция скорости вытяжки двухслойной ленты W , может быть найден из соотношения

$$G_1 = \frac{\pi}{4} [D_1^2 - (D_1 - 2\delta_1)^2] \cdot W \rho_1 = \pi (D_1 \delta_1 - \delta_1^2) \cdot W \rho_1 \quad (1)$$

Аналогично можно показать, что расход адгезива

$$G_2 = \pi \cdot (D_3 \delta_2 + \delta_2^2) \cdot W \rho_2, \quad (2)$$

где: δ_2 – толщина слоя адгезива, ρ_2 – его плотность.

Исходя из уравнений (1), (2) и очевидных соотношений $\delta_1 = 0,16 - \sqrt{0,0256 - 0,0003462 G_1 / W}$; $\delta_2 = -0,1586 + \sqrt{0,02515 + 0,0003317 G_2 / W}$ была построена диаграмма для оперативного определения G_1 и G_2 , рис. 1. Рассматривалась степень раздува $K = 1,2$ ($D_1 = 0,324$), суммарная толщина ленты $D = \delta_1 + \delta_2 = 1,4 \cdot 10^{-3}$ м, $\rho_1 = 920$ кг/м³, $\rho_2 = 960$ кг/м³.

Алгоритм вычисления зависимостей $G_1 = f_1(W)$ и $G_2 = f_2(W)$ в терминах MATLAB R12 имеет вид: [W,G] = meshgrid(30:10:100, 10:10:100); dell = (0,16 - sqrt(0,0256 - 0,0003462 * G1 / W)) * 1000; A=0.5:0.1:1.1; [C,h]=contour(W,G1,dell,A); Grid on Clabel(C,h) xlabel('G1,kg/h'). [W,G2]= meshgrid(30:10:100, 10:10:100); del2=(0,1586+ sqrt(0,02515 + 0,0003317 * G2/W)) * 1000; B=0.3:0.1:0.9; [C,h]=contour(W,G2,del2,B); grid on Clabel(C,h) xlabel('W,m/h') ylabel('G2,kg/h'). Определение расходов полиэтилена и адгезива сводится к заданию скорости вытяжки $W_{\text{зад}}$, толщин слоев δ_1 и δ_2 и нахождению ординат точек пересечения линии $\delta_i = f_i(W)$ с линией $W_{\text{зад}} = \text{const}$, рис. 1. Выбор произвольных значений G_i при фиксированной скорости вытяжки W или случайных W при неизменных расходах приведет к искажению геометрии рукава, а в отдельных случаях и увеличению усадочности двухслойной ленты.

Из диаграммы следует, что при заданных δ_i определяющую роль играет скорость вытяжки W . Актуально определение области ее рациональных значений. Нижняя граница W может быть задана возможностью фор-

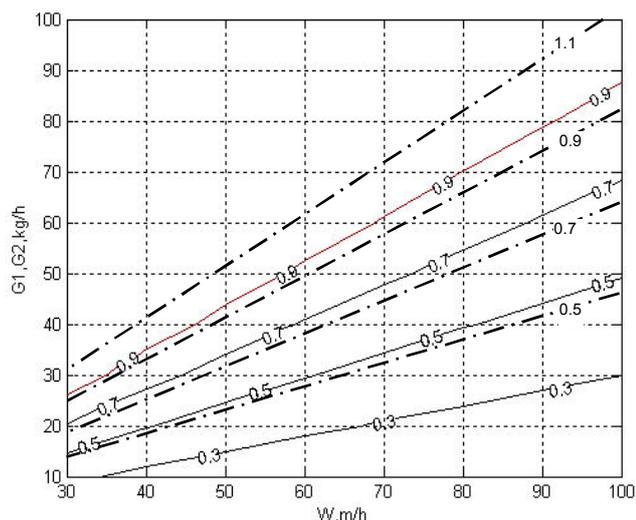


Рис. 1. Диаграмма для определения расходов ПЭВД 153-10К (- · -) и адгезива КРА-09 (—) при различных δ_1 и δ_2

мирования двухслойной ленты толщиной $1,4 \cdot 10^{-3}$ м при малых расходах $G = f(W)$, а также чисто экономической целесообразностью, сопоставлением затрат на производство и собственно его производительностью. Установлено, что для линии ЛРП 90/90-500 это 40–50 кг/час ($30 \leq W \leq 35$ м/час; $20 \leq G_1 \leq 23$ кг/час; $20 \leq G_2 \leq 24$ кг/час). Оценка верхней границы W может быть получена из условия обеспечения когезионной прочности расплава полимеров на участке от устья формирующей головки до линии кристаллизации.

Рассмотрим изменение температуры в нестационарных условиях формирования двухслойной ленты. С учетом того, что $\delta_i \ll D_1$ стенка рукава может быть представлена как неограниченная плоская пластина толщиной D с начальной температурой T_0 , мгновенно помещенная в среду с температурой T_c . При условии теплообмена по закону Ньютона (граничное условие третьего рода) уравнение теплопроводности совместно с начальным и граничным условием имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} &= a \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} & T(x, 0) &= T_0 \\ \lambda \frac{\partial T(d, \tau)}{\partial x} &= \alpha [T(d, \tau) - T_c] \\ \lambda \frac{\partial T(-d, \tau)}{\partial x} &= -\alpha [T(-d, \tau) - T_c] \end{aligned} \quad (3)$$

где: $T(x, \tau)$ – текущая температура; x – координата; τ – время; a – коэффициент температуропроводности; λ – коэффициент теплопроводности; α – коэффициент теплоотдачи.

В общем виде решение уравнений (3) будет [6]:

$$T(x, \tau) = T_0 - (T_0 - T_c) \left[1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \sin(m_n)}{m_n + \sin(m_n) \cdot \cos(m_n)} \times \right.$$

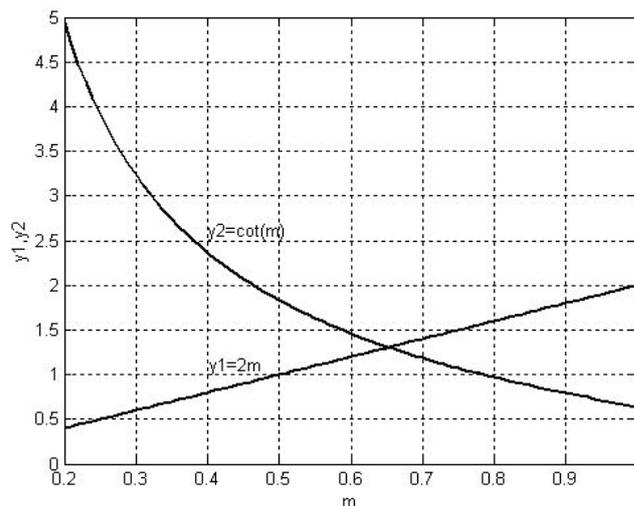


Рис. 2. Определение первого корня уравнения $\text{ctg}(m) = m\lambda/\alpha d$

$$\times \cos(m_n \frac{x}{d}) \exp(-m_n^2 \frac{a}{d^2} \tau) \quad (4)$$

аргументы m_n являются корнями уравнения

$$\text{ctg}(m) = m\lambda / \alpha d. \quad (5)$$

С учетом принудительного охлаждения на стадии раздува рукава ($\alpha = 100$ Вт/(м²·К)), теплофизических свойств двухслойной ленты ($\lambda = 0,28$ Вт/(м·К); $a = 12 \cdot 10^{-8}$ м²/с) и $D = 1,4 \cdot 10^{-3}$ м графически были определены корни уравнения (5): $m_1 = 0,645$ (рис. 2); $m_2 = 3,293$; $m_3 = 6,361$. Для наиболее неблагоприятных условий ($x = 0$ – середина образца, $\tau = 1$ с – практически момент его погружения в среду с температурой T_c) были определены и сопоставлены слагаемые уравнения (4). Оказалось, что слагаемые, начиная со второго (рассчитанные на базе соответственно m_2 и m_3), существенно меньше первого ($1,0415 > -0,045$ и $\gg 0,002$), и, как и все последующие, могут быть опущены при расчете температуры стенки рукава. Иначе, оправдан анализ выражения (4) в виде:

$$\begin{aligned} T(x, \tau) &= T_0 - (T_0 - T_c) \cdot [1 - 1,0684 \times \\ &\times \cos(460,7x) \cdot \exp(-\frac{m_1^2 a}{d^2} \tau)] \end{aligned} \quad (6)$$

Расчет температур по соотношению (6) показал, что на протяжении длительного (с позиции формирования ленты) времени (от 1 до 20 с) в стенке рукава имеет место существенный градиент температур, рис. 3. Это делает невозможным расчет температур, используя соотношение $T(\tau) = T_0 + (T_0 - T_c) \cdot \exp(-m^2 a \tau / d^2)$, полученное при анализе формирования экструдированного защитного покрытия на базе ГТК-09 и КРА-09: в десятки раз отличается время достижения заданного состояния рукава и изоляции трубы.

Критерием, определяющим максимальное значение скорости вытяжки, может служить длина стабильного бездефектного участка расплавов полимеров от устья

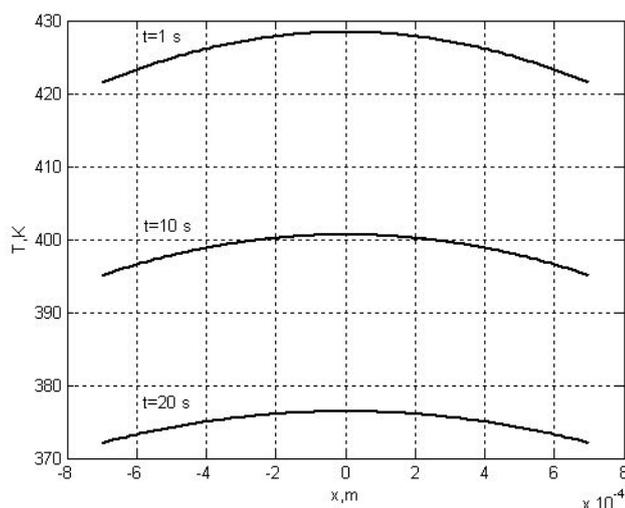


Рис. 3. Распределение температур по толщине стенки рукава

головки до линии кристаллизации. Оправдана оценка длины этого участка как продольной координаты расплава рукава с температурой поверхности ($x = 0,7 \cdot 10^{-3}$ м), равной температуре отверждения расплавов полимеров T_k . Из уравнения (6) следует, что

$$W = -\frac{m_1^2 a}{d^2} \cdot \left[\ln \left(\frac{1}{1,0684} \cdot \frac{T_k - T_c}{T_0 - T_c} \right) \right]^{-1} \cdot L \quad (7)$$

Граница стабильных режимов формирования ленты была определена экспериментально – найдено, что при $L > 0,7 \dots 0,8$ м имеет место деформация рукава. С определенным запасом было принято, что $L_{\max} \leq 0,6$ м.

Принимая $T(0,7 \cdot 10^{-3}, \tau) = T_k = 353$ К; $m_1 = 0,645$; $a = 12 \cdot 10^{-8}$ м²/с; $d = 1,4 \cdot 10^{-3}$ м; $T_0 = 423$ К; $T_c = 293$ К; $L = L_{\max} = 0,6$ м, из выражения (7) нашли, что верхняя граница скорости вытяжки составляет ~ 65 м/час.

Получение двухслойной ленты для ремонта повреждений защитных покрытий осуществлялось на соэкструзионной линии ЛРП 90/90-500 АОЗТ “Укркомунсервис” (рис. 4). В качестве базовых полимеров при получении ленты был выбран полиэтилен высокого давления (ПЭВД) марки 153-10к и клей-расплав КРА-09 [3]. С учетом характеристик ингредиентов были установлены температурные режимы экструзии, табл. 1.

Опираясь на выявленный диапазон рациональных скоростей вытяжки, было принято $W = 50$ м/час. С помощью диаграммы (рис. 1) были найдены расходы полиэтилена $G_1 = 32,7$ кг/час, и адгезива $G_2 = 33,8$ кг/час при соотношении их толщин 1 : 1. Производи-

тельность установки – 66,5 кг/час. За счет принудительного охлаждения воздухом ($T_c = 293$ К) температура расплавов снижалась с 413–423 до 353 °С. Было определено расстояние от устья соэкструзионной головки до линии кристаллизации $L_s = 0,43–0,48$ м. Расчет по формуле (7) дает близкий результат $L = 0,4576$ м.

Полученный результат, а также эксперименты при скорости вытяжки 40 м/час (погрешность до 12 %) свидетельствуют о состоятельности построенной на достаточно общих исходных посылах модели, уравнения (1, 2, 7), целесообразности ее использования при расчете взаимосвязи между скоростью вытяжки, расходами ингредиентов, геометрией ленты в условиях устойчивого (без деформаций, разрыва сплошности, потери когезионной прочности) состояния экструдата.

Была изготовлена опытная партия двухслойной ленты в количестве 360 кг толщиной $(1,4 \pm 0,2) \cdot 10^{-3}$ м. Усадка ленты не превышала 10 %. Лента была использована при ремонте поверхностных и сквозных повреждений заводского полиэтиленового покрытия НПП “Укртрубоизол” и покрытия “Термизол”.

В случае незначительных (до $20 \cdot 10^{-4}$ м²) повреждений (сдиры, царапины, вмятины) ремонт осуществляли путем плавления стренг КРА-09 с последующим разглаживанием размягченного полимера до толщины базового покрытия (стренги адгезива получали путем продавливания через фильеру диаметром $0,5 \cdot 10^{-3}$ м). При сквозном повреждении площадью $\sim 60 \cdot 10^{-4}$ м² зачищенную зону дефекта грунтовали ГТК-09, сушили до состояния “на отлип” (30–40 с), заполняли клеем-расплавом, нагревали до размягчения, устанавливали заплату из двухслойной ленты и усаживали ее феном или пламенем газовой горелки. Процесс завершали при выделении из-под заплаты адгезива.

Были исследованы адгезионные и диэлектрические характеристики отремонтированных участков покрытия, их стойкость в условиях катодной поляризации, табл. 2.

Табл. 2 свидетельствует, что использование предложенных грунтовок, адгезива и двухслойной ленты позволяет без предварительного разогрева тела трубы восстановить характеристики участков поврежденной изоляции до уровня требования ДСТУ 4219-2003, практически снимает угрозу перегрева базового покрытия, образования прожогов и отслоения.

Были разработаны технические условия ТУ У 20.05-035563790-009:2014 “Комплект изоляционных

Таблица 1. Температурные режимы

Ингредиент	Температура по зонам червячных прессов, К					Температура расплавов в соэкструзионной головке, К		Температура плавления ингредиентов, К
	I	II	III	IV	V	На входе	На выходе	
ПЭВД 153-10К	353	403	413	423	443	443–448	413–423	376–383
КРА-09	343	373	403	413	423			361–363

Таблица 2. Свойства поврежденных участков после ремонта изоляции

Показатель	Ремонт сквозных дефектов заводской полиэтиленовой изоляции на трубах диаметром 530 мм						Норма по ДСТУ 4219
	Экструдированное покрытие НПП “Укртрубоизол” толщиной 2,2 мм			Покрытие на основе термусадочных материалов “Термизол” толщиной 2,0 мм			
1. Адгезия к загрунтованной стали при температуре 20 °С, Н/мм	8,6	8,8	9,2	9,0	8,7	9,1	Не менее 7,0
2. Адгезия к заводскому полиэтиленовому покрытию при температуре 20 °С, Н/мм	7,5	7,2	7,6	7,5	7,0	7,4	Не менее 5,0
3. Адгезия к загрунтованной стали после 1000 часов выдержки в воде при температуре 20 °С, Н/мм	7,0	7,2	7,3	7,4	7,2	7,1	Не менее 5,0
4. Адгезия к заводскому полиэтиленовому покрытию после 1000 часов выдержки в воде при температуре 20 °С, Н/мм	5,3	5,6	5,9	5,2	5,8	5,0	Не менее 3,5
5. Радиус отслоения покрытия при катодной поляризации при температуре 20 °С, мм	2,6–3,3						Не более 11,0
6. Диэлектрическая сплошность. Отсутствие пробоя электрическим током при напряжении 5 кВ/мм толщины	Выдерживает						Выдерживает

материалов для ремонта мест повреждений заводского полиэтиленового покрытия” и “Технологическая инструкция процесса ремонта локальных повреждений изоляционных покрытий”. Используя изготовленные ремонтные материалы, в условиях ПАО “Укргазстрой” были отремонтированы сквозные дефекты изоляционного экструдированного покрытия на 180 пог. м труб диаметром 219 мм и 530 мм и на 100 пог. м труб диаметром 530 мм с покрытием лент “Термизол”. Отре-



Рис. 4. Линия ЛРП 90/90-500

монтированные участки по своим физико-механическим и защитным свойствам отвечали требованиям современных нормативных документов ДСТУ 4219-2003 “Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии” и ТУ У 20.05-03563790-009: 2014 “Комплект изоляционных материалов для ремонта мест повреждений заводского полиэтиленового покрытия”.

В ходе проведения ремонтных работ полиэтиленовых покрытий заводской изоляции установлено, что предложенные материалы и способ их применения для восстановления поврежденной изоляции, особенно в трассовых условиях, позволяет существенно снизить энергозатраты и время ремонта.

1. Середницький Я., Банахевич Ю., Драгілев А., *Сучасна протикорозійна ізоляція в трубопровідному транспорті*, Львів, ТзОВ “Сплайн”, 2004, 276.

2. Гольдфарб А.Я., *Коррозия ТНГ*, 2 (10), 2008.

3. Пат. України № 106003, Спосіб локального і вибіркового ремонту ізоляційного покриття сталевих трубопроводів в заводських і трасових умовах. Л.М. Шкарапута, Л.Л. Митрохіна, І.П. Морозова, Бюл. № 13, 2014.

4. Пат. України № 98216. Ізоляційне екструдоване поліетиленове покриття для антикорозійного захисту сталевих трубопроводів, що наноситься за енергозберігаючою технологією. Л.М. Шкарапута, В.П. Кухар, Л.Л. Митрохіна, І.П. Морозова, А.О. Губернік, Бюл. № 8, 2012.

5. Шкарапута Л.М., Митрохіна Л.Л., Морозова

І.П., *Каталіз і нефтехімія*, 2012, (20), 52–57.

6. *Handbook of heat transfer*, 3rd ed, Ed. by M. Warren, Rohsenow Jams P. Harnett and I. Young, New York, NY, Mc Craw-Hill, 1997.

7. Шкарапуга Л.М., Митрохіна Л.Л., *Каталіз і нефтехімія*, 2007, (150), 63–66.

Поступила в редакцію 28.09.2016 г.

Двошарові стрічки для ремонту локальних ушкоджень захисних покриттів трубопроводів

Л.М. Шкарапуга, Л.Л. Митрохіна, І.П. Морозова

*Інститут біоорганічної хімії та нафтохімії НАН України,
Україна, 02160 Київ, Харківське шосе, 50; тел.: (044) 559-66-47*

Розроблено наукові засади промислового виробництва матеріалів для ремонту локальних пошкоджень трубопроводів. Проаналізовано закономірності нестационарних режимів охолодження вихідних полімерів, запропоновано співвідношення, що зв'язують геометрію двошарової стрічки, витрати інгредієнтів, швидкість витяжки та величину ділянки стабільного формування вихідного рукава стрічки. Знайдено оцінку діапазону раціональних величин швидкості витяжки. У промислових умовах напрацьовано ремонтні матеріали і усунуто локальні пошкодження ізоляції на 280 погонних метрах труб діаметром 219 мм і 530 мм. Використання оригінальних матеріалів дозволяє відмовитися від розігріву труби до 110–130 °С, істотно скорочує час ремонту і дає можливість відновити характеристики пошкоджених ділянок захисного покриття до рівня вимог ДСТУ 4219-2003.

Double tape for repairing local damage protective coatings of pipelines

L.N. Shkaraputa., L.L. Mitrokhina, I.P. Morozova

*Institute of Bioorganic Chemistry and Petrochemistry, NAS of Ukraine,
Ukraine, 02160 Kyiv, Kharkiv highway, 50; Tel.: (044)559-66-47*

The scientific bases of the industrial production of materials for repairing local damage to pipelines have been developed. The patterns of transient regimes of starting polymers cooling have been analyzed. The interrelations between geometry of the two-layer tape, cost of the ingredients, drawing speed and area of the site of stable formation of the original tape sleeve, estimation of range of the drawing speed rational values have been found. The repair materials have been tried and tested and local insulation damages of 280 running meters of pipes with diameter of 219 mm and 530 mm have been repaired in an industrial environment. The use of original materials enables to avoid the need to heat the pipe to 110–130 °C, significantly cuts repair time and makes it possible to restore the characteristics of the damaged portions of the protective coating to meet requirements of DSTU 4219-2003.