

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ  
ЗА ПРЕДЕЛАМИ НОРМАТИВНОГО СРОКА СЛУЖБЫ ПУТЕМ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ  
ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ КОЛЬЦЕВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

**А. Н. ЯНУШОНОК<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц. А. С. СНАРСКИЙ<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,  
Новополоцк, Беларусь

<sup>2</sup> Филиал БНТУ «Межотраслевой институт повышения квалификации  
и переподготовки кадров по менеджменту и развитию персонала БНТУ»,  
Минск, Беларусь

Срок эксплуатации более 60% линейной части магистральных нефтегазопроводов в Республике Беларусь превышает 33 года, что свидетельствует о её старении. Старение магистральных нефтегазопроводов проявляется в деградации структуры и механических свойств основного металла и сварных соединений, и в первую очередь ударной вязкости, которая может снижаться в 3 и более раз [1]. Основным последствием снижения ударной вязкости является повышение вероятности развития трещин, что ведет к росту риска аварийного разрушения магистрального нефтегазопровода по ослабленным зонам. Наиболее высокая интенсивность деградационных процессов наблюдается на участках со структурной неоднородностью, которыми являются в первую очередь сварные соединения [2]. При этом постоянного контроля значений ударной вязкости не ведется.

Таким образом, актуальным направлением совершенствования эксплуатации магистральных нефтегазопроводов является разработка и внедрение способа неразрушающего диагностирования их механических свойств, определяющего момент объективной необходимости остановки трубопровода и с целью проведения ремонтных работ по восстановлению ударной вязкости материала кольцевых стыков.

Одна из задач технического диагностирования объекта состоит в расчете его остаточного ресурса в виде экстраполяции изменения в ретроспективе значений основного параметра, определяемых при текущем диагностировании, при условии сохранения существующих условий эксплуатации. Основным параметром при определении остаточного ресурса линейной части магистральных нефтегазопроводов принята ударная вязкость KCU материала их кольцевых сварных соединений, которая может быть определена без вырезки образцов по результатам измерения твердости способом, предлагаемым в работе [3]. Скорость деградации ударной вязкости кольцевых сварных стыков магистральных нефтегазопроводов рассчитывается в результате измерения её значений в процессе эксплуатации через определенные интервалы времени: начальное значение при вводе в эксплуатацию  $\Rightarrow$  диагностирование  $\Rightarrow$  ...  $\Rightarrow$  окончание расчетного срока эксплуатации  $\Rightarrow$  восстановление значений ударной вязкости  $\Rightarrow$  диагностирование  $\Rightarrow$  расчет остаточного ресурса ...  $\Rightarrow$  вывод из эксплуатации.

Изменение ударной вязкости кольцевых сварных соединений в течение эксплуатации не является монотонным. Точное определение скорости изменения ударной вязкости возможно при наличии трех и более измерений KCU. Для этого строится график в координатах «KCU (МДж/м<sup>2</sup>) – время эксплуатации  $\tau$  (лет)», в котором значения KCU определены в узловых точках

$$KCU(\tau_0), KCU(\tau_1), KCU(\tau_2), \dots, KCU(\tau_m),$$

здесь  $\tau_0, \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m$  – начальное (нулевое) и последовательные (1-е, 2-е, ...,  $m$ -е) значения наработки объекта.

Сглаживание графика производится путем аппроксимации его полиномиальной зависимостью  $KCU = KCU(\tau)$ . Для этого используется интерполяционный полином Лагранжа. По значениям функции  $KCU(\tau)$  в узловых точках находится целый многочлен  $L(\tau)$  наименьшей степени, который в заданных точках  $\tau_i$  ( $i = 0, 1, 2, \dots, m$ ), называемых узлами интерполирования, принимает те же значения, что и сама функция  $KCU(\tau)$ . При этом, для любого  $\tau$  справедлива интерполяционная формула Лагранжа

$$KCU(\tau) = L(\tau) = \sum_{i=0}^{i=m} KCU(\tau_m) l_m(\tau). \quad (2)$$

Степень многочлена, при этом, не выше  $m$ . Для поиска полинома  $L(\tau)$ , удовлетворяющего указанным условиям, рассчитываем многочлены  $l_k(\tau)$

$$l_k(\tau) = \frac{(\tau - \tau_0) \cdot (\tau - \tau_1) \cdot \dots \cdot (\tau - \tau_{k-1}) \cdot (\tau - \tau_{k+1}) \cdot \dots \cdot (\tau - \tau_m)}{(\tau_k - \tau_0) \cdot \dots \cdot (\tau_k - \tau_{k-1}) \cdot \dots \cdot (\tau_k - \tau_{k+1}) \cdot \dots \cdot (\tau_k - \tau_m)}. \quad (3)$$

где  $k = 0, 1, 2, \dots, m$ , которые соответственно индексу, принимают значения 1 при  $\tau = \tau_k$  и обращаются в 0 при  $\tau = \tau_i$ , если  $i \neq k$ .

Интерполяционный полином Лагранжа равен сумме уравнений (3). С помощью экстраполяции интерполяционного многочлена  $KCU(\tau)$  находится точка пересечения графика с граничной горизонтальной линией, отстоящей от оси ординат на расстоянии  $KCU_{\text{доп}}$ , что определяет допустимое значение наработки трубопровода до предельного состояния его материала по критерию ударной вязкости. До этого момента времени трубопровод должен быть остановлен, а материал его труб должен пройти восстановление указанного свойства специальной восстановительной термической обработкой. Предложенный способ диагностирования линейной части магистрального нефтегазопровода, определяет момент его остановки для выполнения ремонтных работ, отличающийся использованием интерполяционного полинома Лагранжа, связывающего наработку трубопровода с изменением ударной вязкости его материала, характеризующийся уменьшением погрешности расчетов в 6–7 раз по сравнению с классическими методами интерполяции.

Восстановление ударной вязкости материала кольцевых стыков магистральных нефтегазопроводов в рамках проведения ремонтных работ может осуществляться при помощи специальной термической обработки непосредственно в полевых условиях. Для этой цели разработаны и запатентованы процесс восстановительного ремонта нефтегазопроводов (с применением специальной восстановительной термической обработки кольцевых сварных соединений) [4] и пламенный нагреватель для его осуществления [5].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Нохрин, А. В. Старение сталей труб магистральных газопроводов / А. В. Нохрин, В. Н. Чувильдеев // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. – 2010. – №5 (2). – С. 171–180.
2. Старение труб нефтепроводов / А. Г. Гумеров [и др.] – М.: Недра, 1995. – 218 с.
3. Снарский А. С. Неразрушающий метод определения механических характеристик металла труб магистрального трубопровода / А. С. Снарский, А. Н. Янушонок // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2024. – № 2. – С. 135–143.
4. Патент С1 ВУ, МПК С21D 9/50, С21D 9/08, С21D 9/14, В23Р 6/00. Способ восстановления ударной вязкости кольцевого сварного соединения магистрального трубопровода / Снарский А.С., Янушонок А.Н. – № 18468;

Заявлен 13.02.2012; Опубликовано 30.08.2014 // Афіцыйны бюлетэнь. / Нацыянальны центр інтэлектуальнай уласнасці. – 2014. – № 4. – С. 119.

5. Патент С1 ВУ, МПК F 16L 53/00, Нагреватель для термообработки кольцевых сварных соединений магистрального трубопровода / Янушонок А. Н. – № 24373; Заявл. 07.12.2022; Опубл. 2024 // Афіцыйны бюл. / Нац. Центр інтэлектуал. уласнасці. – 2024. – № 5.