

## ИНЖЕНЕРНЫЕ СЕТИ И ЭКОЛОГИЯ

УДК 622.692.4.053.621.643.411.4:627.257

### ИЗМЕНЕНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ УЧАСТКОВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ, ПРЕТЕРПЕВШИХ ДЛИТЕЛЬНУЮ ЭКСПЛУАТАЦИЮ, ПОД ВЛИЯНИЕМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОТПУСКА

**А.Н. ЯНУШОНОК**

*(Полоцкий государственный университет);*

*канд. техн. наук, доц. А.С. СНАРСКИЙ*

*(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

*Возраст линейной части системы транспортирования жидких и газообразных углеводородных энергоносителей Беларуси превышает назначенный амортизационный срок или приближается к нему. В процессе эксплуатации в трубных сталях протекают процессы накопления повреждений и старения, в результате которых происходит охрупчивание трубного материала. Особенно сильно данный эффект проявляется в структурно-неоднородных областях, которыми являются сварные соединения. Одним из методов восстановления вязкопластичных свойств трубного материала является высокотемпературное термическое воздействие. В то же время отсутствуют исследования о влиянии данного метода на другие эксплуатационные свойства. В статье рассмотрено влияние высокотемпературного отпуска на коррозионную стойкость участков кольцевого сварного соединения магистральных трубопроводов, претерпевших длительную эксплуатацию.*

**Введение.** Транспортирование нефти и нефтепродуктов по трубопроводам имеет значительное технико-экономическое преимущество по сравнению с другими видами транспорта, поэтому трубопроводный транспорт широко применяется для этих целей во всех странах мира. Срок службы магистральных трубопроводов, как и любой металлической конструкции, в той или иной степени определяется скоростью протекания коррозионных процессов. Коррозионные повреждения труб могут стать причиной отказов линейной части длительно эксплуатируемых трубопроводов [1]. Таким образом, обеспечение надежности и безопасности системы магистрального транспорта нефти и нефтепродуктов напрямую связано с защитой линейной части от коррозионного разрушения. В процессе коррозии происходит окисление металла. Образующиеся при этом химические соединения – оксиды металлов – являются более устойчивыми для большинства металлов [2].

Подземные стальные трубопроводы могут подвергаться коррозии под воздействием почвы, перекачиваемого продукта и блуждающих токов. Механизм протекания коррозионного процесса в чистом виде делят на химический и электрохимический [3].

Химическая коррозия возникает при непосредственном взаимодействии металла с агрессивной средой, при этом окисление металла и восстановление окисленного компонента коррозионной среды (деполяризатора) протекают в одном акте. Продукты коррозии, получившиеся в результате взаимодействия, образуют на всей поверхности металла, находящегося в контакте с коррозионной средой, сплошную неравномерную пленку. Данный процесс характерен в основном для внутренней поверхности магистральных трубопроводов [4] при воздействии растворенных в нефти и нефтепродуктах агрессивных веществ, например, соединений серы на металл труб. Наиболее интенсивно он протекает при неполном заполнении перекачиваемым продуктом сечения трубопровода, в результате которого в образовавшиеся полости выделяются коррозионно-активные пары воды и сероводорода. На пониженных участках могут образовываться застойные зоны, в которых из-за разности плотностей происходит сепарация воды на нижней образующей, что приводит к строчной коррозии [5].

Электрохимическая коррозия – взаимодействие металла с коррозионной средой (раствором электролита), при котором окисление металла и восстановление окисленного компонента коррозионной среды (деполяризатора) протекают не в одном акте. Данный коррозионный механизм характеризуется одновременным течением двух реакций – окисления и восстановления, локализованные на определенных участках поверхности корродирующего металла [6]. Процесс растворения металла сопровождается передвижением электронов по поверхности металла и ионов в растворе электролита от одного участка к другому, т.е. возникновением электрического тока. Продукты коррозии образуются только на анодных участках, что приводит к образованию местных каверн и сквозных отверстий. Коррозионные процессы, про-

текающие по электрохимическому механизму, более характерны для наружной поверхности трубопровода, что обусловлено значительной протяженностью коммуникаций по транспорту углеводородов. Подземные коммуникации проложены через почвы различного состава и строения, различной влажности и аэрации, что в совокупности с имеющимися повреждениями изоляционного покрытия создает возможность появления значительных разностей потенциалов между отдельными частями подземной линии и, следовательно, является причиной течения коррозионных процессов по электрохимическому механизму.

Скорость протекания коррозии зависит от механизма ее реализации, степени защищенности металла, его свойств и свойств коррозионной среды [7]. В то же время существует ряд факторов, действие которых в значительной мере изменяет скорость коррозионных процессов: механические напряжения, эрозионные процессы, действие бактерий, блуждающие токи и др. Одновременное действие некоторых из них может привести к изменению коррозионного механизма, при котором снижение механических свойств значительно больше, чем это имело бы место в результате раздельного, но аддитивного действия этих факторов [8].

Надежность трубопровода в процессе эксплуатации в значительной мере определяется качеством сварных соединений [5]. На вырезанных из действующих магистральных трубопроводов во время ремонта катушках зачастую заметно большее коррозионное повреждение зоны сварного соединения по сравнению с основным металлом трубопровода, что подтверждается и результатами измерений. Так, например, в работе [8] приведены данные исследования дефектов и продуктов коррозии фрагментов труб длительно эксплуатируемого магистрального нефтепровода, принадлежащего НРУПТН «Гомельтранснефть «Дружба». По данным авторов, толщина пленки окислов в различных зонах поверхности трубы изменяется в широких пределах: в областях сварных соединений она находится в диапазоне 30...350 мкм, в зонах термического влияния 20...300 мкм, основного металла трубы 5...120 мкм. Наибольшее коррозионное разрушение наблюдается в местах дефектов – канавках, расположенных с двух сторон от шва.

**Методика определения коррозионной стойкости участков сварных соединений магистральных трубопроводов.** В работе [1] рассмотрена возможность повышения вязкопластических свойств металла труб, а следовательно и надежности магистральных трубопроводов, претерпевших длительную эксплуатацию, за счет термического воздействия. Нами был уточнен режим оптимальной обработки для кольцевых сварных соединений. В то же время при высокотемпературном воздействии происходит изменение прочностных характеристик и микроструктуры как непосредственно самого сварного шва, так и зоны термического влияния, что в свою очередь оказывает влияние на сопротивление сварного соединения коррозионным процессам. Следовательно, встает задача определения влияния термической обработки на коррозионную стойкость сварных соединений магистральных трубопроводов, проработавших длительное время.

С целью определения влияния термической обработки на коррозионную стойкость различных участков сварного соединения магистральных нефте- и нефтепродуктопроводов, претерпевших длительную эксплуатацию в условиях Республики Беларусь, проведены исследования изъятых из магистрального нефтепродуктопровода «Участок № 42» («Стальной Конь – Запад») ЧУП «Запад-Транснефтепродукт» темплетов. Исследование проводилось на образцах труб, изготовленных из низколегированной стали 09ГС, 10Г2С1 и 17ГС, диаметром 530 мм, эксплуатировавшихся в течение 44 лет. Для определения склонности к коррозии производилась разделка поперечных сварных соединений при помощи шлифмашины с отрезным кругом. На каждом стыковом сварном соединении вырезались непосредственно сам сварной шов, околошовная зона (зона термического влияния) и участок основного металла трубы. Последующая механическая обработка на фрезерном станке и шлифовка наждачной бумагой с мелким зерном позволила удалить зону нагрева, образовавшуюся при резке стыкового соединения трубопровода, и получить образцы (рис. 1) единого размера с длиной по окружности трубопровода 175 мм и шириной 10 мм. Толщина образца определялась толщиной стенки трубопровода, несколько уменьшенной за счет удаления слоя, подвергшегося коррозии за время эксплуатации. Половина изготовленных образцов подверглась термической обработке по оптимальному режиму.



Рис. 1. Образец для испытаний на коррозионную стойкость

При выборе метода коррозионного испытания необходимо учитывать характер коррозионного процесса, состав и свойства коррозионной среды, условия работы объекта [9]. В то же время полноценное моделирование условий протекания коррозионных процессов в магистральных трубопроводах затруднено, ввиду необходимости создания высоких давлений и скоростей движения коррозионной среды для определения скорости внутренней коррозии и значительной неопределенности в силу разнообразия свойств почвенного электролита при моделировании внешней. В связи с этим выбран упрощенный метод испытания – полное погружение образцов в коррозионную среду (неэлектролит) в открытом сосуде при комнатной температуре без перемешивания коррозионной среды. Лабораторная установка (рис. 2) представляет собой емкость из оргстекла, наполненную водой в которую погружались исследуемые образцы, подвешенные на неэлектропроводящем материале. В качестве показателя коррозии выбран метод изменения массы, являющийся наиболее простым и надежным, поскольку непосредственно показывает количество металла, разрушенного коррозией.



Рис. 2. Лабораторная установка для определения коррозионной стойкости (4-й день испытаний)

Испытания проводились в соответствии с ГОСТ 9.908 «Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости». Перед проведением экспериментальных исследований образцы обезжиривались спиртом, а продукты коррозии удалялись химическим методом очистки (10 % раствор серной кислоты + 0,5 % тиомочевины в течение 10 минут) в соответствии с ГОСТ 9.907-83 «Методы удаления продуктов коррозии после коррозионных испытаний». Продолжительность испытаний в соответствии с рекомендациями ГОСТ 9.905-82 «Методы коррозионных испытаний» составила 4, 8, 16 и 32 суток, что позволило оценить изменение скорости коррозии. По окончании выдержки в коррозионной среде образцы с целью удаления продуктов коррозии сначала промывались в дистиллированной воде, а затем подвергались химической обработке. Определение потерь массы осуществлялось взвешиванием образцов на аналитических весах с точностью до 0,0001 грамма.

**Обработка и обсуждение результатов эксперимента.** Обработка результатов эксперимента проводилась по следующему алгоритму: на основании данных измерений производилась интегральная оценка скорости коррозии, проводился регрессионный анализ с целью выявления типа и определения количественных параметров регрессии, осуществлялась статистическая обработка результатов эксперимента с целью определения достоверности полученной модели.

Интегральная оценка скорости коррозии определялась как среднее арифметическое значение, полученное на трех образцах. Скорость коррозии  $K$  на каждом из образцов определялась по формуле:

$$K = \frac{m_0 - m_1}{S \cdot t}, \quad (1)$$

где  $m_0$  – масса образца до испытаний, кг;  $m_1$  – масса образца после испытаний и удаления продуктов коррозии, кг;  $S$  – площадь поверхности образца, м<sup>2</sup>;  $t$  – продолжительность испытаний, сут.

Типичные результаты испытаний иллюстрирует таблица 1.

Таблица 1

Типичные значения скорости коррозии  
участков сварного соединения магистральных трубопроводов

Продолжительность испытаний, сут.			4	8	16	32
№ образца	Участок соединения	Состояние образца	Скорость коррозии, кг/м <sup>2</sup> год			
1	Сварной шов	Не обработан	355,2236	352,4633	352,1107	350,0008
		После обработки	346,4507	345,0628	342,9964	341,3131
	Зона термического влияния	Не обработан	360,9462	360,1847	360,439	358,1937
		После обработки	350,2849	348,7619	348,2532	347,3653
	Основной металл	Не обработан	340,7967	339,7809	340,2896	338,1406
		После обработки	337,7447	337,7462	337,236	333,8029
2	Сварной шов	Не обработан	354,0787	353,5856	353,5808	350,7477
		После обработки	346,7099	345,2362	344,8802	342,0727
	Зона термического влияния	Не обработан	361,1121	360,1223	360,1223	356,0789
		После обработки	349,7225	350,4537	347,9735	346,0719
	Основной металл	Не обработан	340,628	339,3629	339,8699	337,8968
		После обработки	339,1118	337,0839	335,6885	335,0141
3	Сварной шов	Не обработан	353,9495	353,2514	351,3315	350,5039
		После обработки	346,2701	345,2229	345,0484	344,1758
	Зона термического влияния	Не обработан	362,8428	362,372	361,2079	360,0843
		После обработки	350,7051	350,2474	349,3195	348,7914
	Основной металл	Не обработан	342,9498	342,2489	342,364	340,7434
		После обработки	341,548	340,8471	341,3126	339,2072

Анализ представленных в таблице данных позволяет сделать следующие выводы:

- скорость коррозии в рассмотренном интервале уменьшается на всех участках сварного соединения с течением времени как для образцов в исходном состоянии, так и для образцов, термически обработанных на оптимальном режиме. Эта тенденция может быть объяснена образованием на поверхности образцов окисной пленки, которая ограничивала доступ коррозионной среды к испытываемому материалу;
- термическая обработка приводит к снижению скорости коррозии на всех участках сварного соединения. Данная тенденция может быть объяснена относительной гомогенизацией микроструктуры и снятием остаточных напряжений.

Проведенный регрессионный анализ показал, что функция изменения скорости коррозии на наблюдаемом этапе исследований может быть с достаточно высокой точностью описана линейным уравнением вида  $y = ax + b$ .

Изменение скорости коррозии участков сварных соединений магистральных трубопроводов, претерпевших длительную эксплуатацию, до и после термической обработки иллюстрируют рисунки 3 – 8).

Для построения линии тренда использовался известный метод наименьших квадратов.

Коэффициенты смещения линии регрессии и угловой коэффициент определялись согласно формулам:

$$a = \frac{n \cdot \sum x_i \cdot y_i - \sum x_i \cdot \sum y_i}{n \cdot \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}, \quad (2)$$

$$b = \frac{\sum x_i^2 \cdot y_i - \sum x_i \cdot \sum x_i \cdot y_i}{n \cdot \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}, \quad (3)$$

где  $x_i$  –  $i$ -тое значение выборки продолжительности испытаний;  $y_i$  –  $i$ -тое значение выборки скорости коррозии.

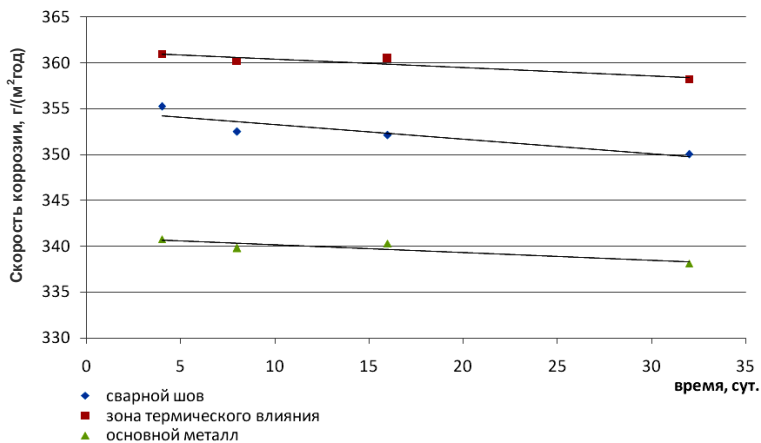


Рис. 3. Скорость коррозии сварного соединения трубопровода. Сталь 09ГС до термической обработки

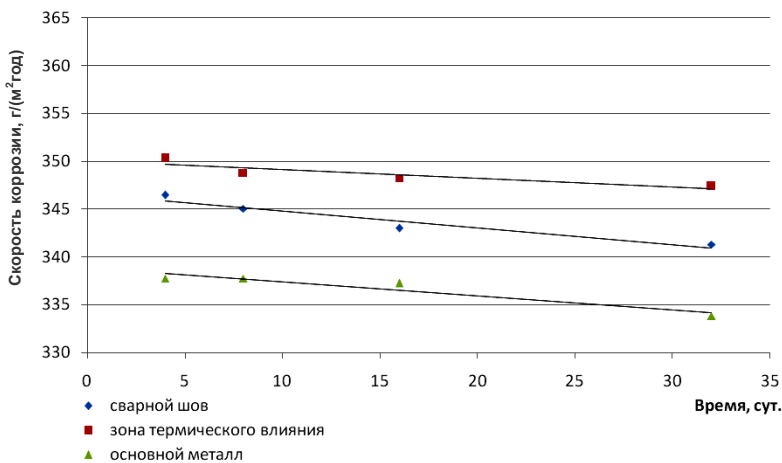


Рис. 4. Скорость коррозии сварного соединения трубопровода. Сталь 09ГС после термической обработки

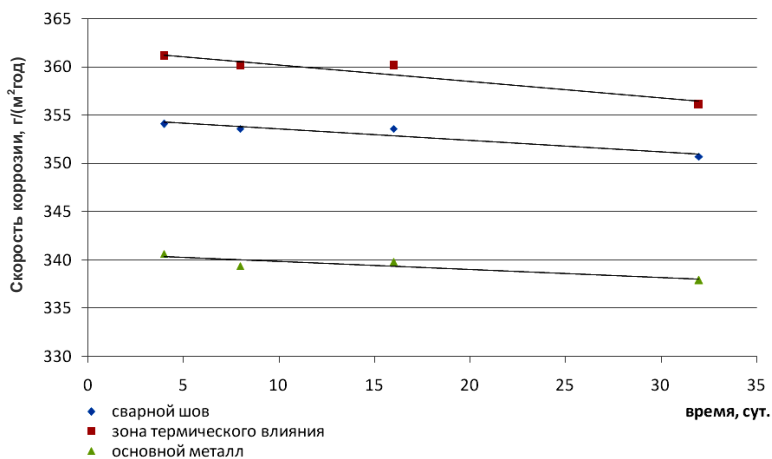


Рис. 5. Скорость коррозии сварного соединения трубопровода. Сталь 10Г2С1 до термической обработки

Как видно из представленных графиков, изменение скорости коррозии в результате термической обработки для разных участков сварного соединения отличается: наиболее существенное снижение наблюдается для зоны термического влияния; менее значительное – для сварного шва; наименее заметное – для основного металла трубопровода. Данная тенденция коррелирует с изменениями в микроструктуре

сварного соединения, где также наиболее заметные изменения в результате термической обработки наблюдаются в зоне термического влияния (видманштеттова структура) и в зоне столбчатых кристаллов в облицовочном шве. Релаксация внутренних напряжений в сварном соединении в таком случае и будет являться основной причиной снижения скорости коррозии в сварных соединениях магистральных трубопроводов после длительной эксплуатации.

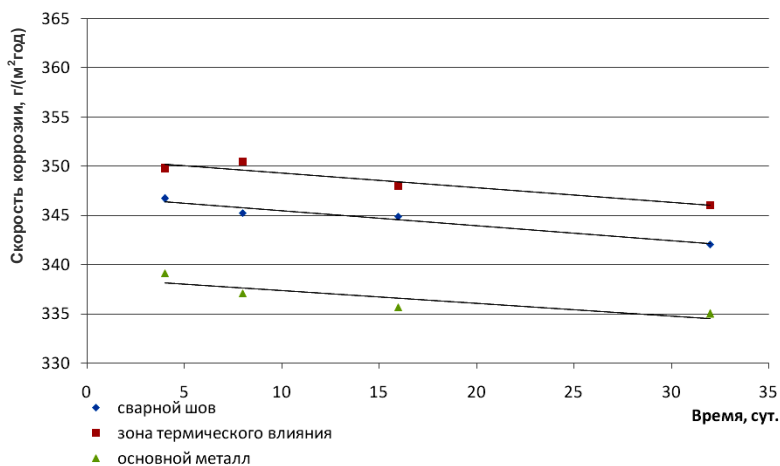


Рис. 6. Скорость коррозии сварного соединения трубопровода. Сталь 10Г2С1 после термической обработки

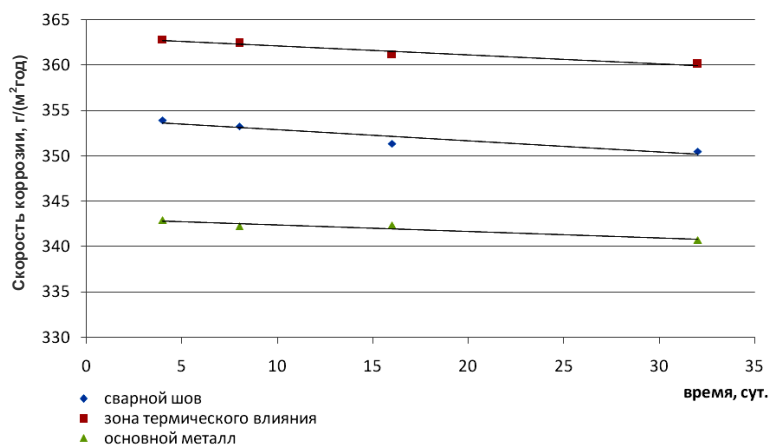


Рис. 7. Скорость коррозии сварного соединения трубопровода. Сталь 17ГС до термической обработки

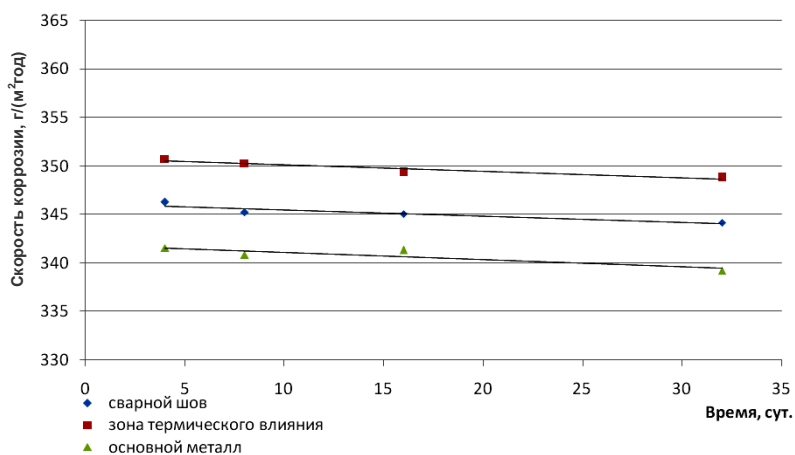


Рис. 8. Скорость коррозии сварного соединения трубопровода. Сталь 17ГС после термической обработки

В результате сравнительного анализа скоростей коррозии в основном металле и сварных соединениях магистральных трубопроводов выявлено:

- с увеличением содержания углерода в трубном материале скорость коррозии несколько возрастает;
- термическая обработка приводит к снижению скорости коррозии на 1...4 % на всех участках сварного соединения, что может быть объяснено относительной гомогенизацией микроструктуры и снятием остаточных напряжений.

Для оценки достоверности рассматриваемой гипотезы проводилась статистическая обработка полученных результатов. Определялись математическое ожидание (средние значения) экспериментальных данных.

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}, \quad \bar{y} = \frac{\sum y_i}{n}, \quad (4)$$

где  $n$  – количество проведенных испытаний;

- дисперсия:

$$D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2; \quad (5)$$

- стандартное отклонение:

$$\sigma = \sqrt{D}; \quad (6)$$

- коэффициенты корреляции и вариации:

$$r_{xy} = \frac{\sum (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum (y_i - \bar{y})^2}}; \quad (7)$$

$$V = \frac{\sigma}{X} \cdot 100 \%. \quad (8)$$

Результаты проведенных расчетов для образцов в исходном состоянии (после длительной эксплуатации) и образцов, подвергшихся термической обработке по оптимальному режиму представлены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты статистической обработки эксперимента

№ образца	Участок соединения	Состояние образца	$a$	$b$	$\bar{x}$	$D$	$\sigma$	$r_{xy}$	$V$
1	Сварной шов	Не обработан	-0,158	354,816	352,4496	3,4517	1,8579	-0,9107	0,53
		После обработки	-0,176	346,6	343,9557	3,8386	1,9592	-0,9647	0,57
	Зона термического влияния	Не обработан	-0,091	361,309	359,9409	1,0927	1,0453	-0,936	0,29
		После обработки	-0,089	350,003	348,6663	1,1231	1,0598	-0,902	0,3
	Основной металл	Не обработан	-0,084	341,009	339,7519	0,9944	0,9972	-0,9012	0,29
		После обработки	-0,147	338,835	336,6325	2,712	1,6468	-0,956	0,49
2	Сварной шов	Не обработан	-0,117	354,749	352,9982	1,7292	1,315	-0,9516	0,37
		После обработки	-0,153	347,019	344,7247	2,815	1,6778	-0,9775	0,49
	Зона термического влияния	Не обработан	-0,173	361,955	359,3589	3,7495	1,9364	-0,9587	0,54
		После обработки	-0,15	350,803	348,5554	2,8681	1,6935	-0,9488	0,49
	Основной металл	Не обработан	-0,083	340,689	339,4394	0,9959	0,9979	-0,8955	0,29
		После обработки	-0,128	338,654	336,7246	2,4567	1,5674	-0,8759	0,47
3	Сварной шов	Не обработан	-0,122	354,095	352,2591	1,9458	1,3949	-0,941	0,4
		После обработки	-0,064	346,141	345,1793	0,554	0,7443	-0,9238	0,22
	Зона термического влияния	Не обработан	-0,098	363,102	361,6267	1,1472	1,0711	-0,9846	0,3
		После обработки	-0,067	350,767	349,7658	0,5657	0,7521	-0,952	0,22
	Основной металл	Не обработан	-0,072	343,159	342,0765	0,663	0,8143	-0,9502	0,24
		После обработки	-0,076	341,874	340,7287	0,8353	0,9139	-0,8959	0,27

Из представленных данных видно, что модуль коэффициента корреляции находится в диапазоне от 0,8759 до 0,9846. Следовательно, характер взаимного стохастического влияния изменения полученных в результате эксперимента случайных величин может быть оценен как сильный. Абсолютные (стандартное и среднеквадратическое отклонение) и относительные показатели (коэффициент вариации) вариации скорости коррозии малы. Экспериментальные значения исследуемой величины находятся в среднем в интервале  $\bar{x} \pm \sigma$ . Это свидетельствует о незначительном рассеивании значений скорости коррозии. Изменение коэффициентов регрессии, корреляции и показателей вариации после термической обработки не имеет закономерности.

**Заключение.** Высокотемпературный отпуск по определенному оптимальному режиму приводит не только к восстановлению вязкопластичных свойств трубного материала, претерпевшего длительную эксплуатацию, но и к снижению скорости коррозии до 4 %. Повышение коррозионной стойкости наблюдается на всех участках сварного соединения, что может быть объяснено относительной гомогенизацией микроструктуры и снятием остаточных напряжений. Наиболее существенное снижение наблюдается для зоны термического влияния, менее значительное – для сварного шва, наименее заметное – для основного металла трубопровода. Данная тенденция коррелирует с изменениями в микроструктуре сварного соединения, где также наиболее заметные изменения в результате термической обработки наблюдаются в зоне термического влияния (видманштеттова структура) и в зоне столчатых кристаллов в облицовочном шве. Релаксация внутренних напряжений в сварном соединении в таком случае и будет являться основной причиной снижения скорости коррозии в сварных соединениях магистральных трубопроводов после длительной эксплуатации. Вышеизложенное позволяет рекомендовать проведение высокотемпературного отпуска с целью повышения эксплуатационных свойств материала сварных соединений магистральных трубопроводов, претерпевших длительную эксплуатацию.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гумеров, А.Г. Безопасность длительно эксплуатируемых магистральных нефтепроводов / А.Г. Гумеров, Р.С. Гумеров, К.М. Гумеров. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. – 310 с.
2. Зиневич, А.М. Защита трубопроводов и резервуаров от коррозии / А.М. Зиневич, В.И. Глазков, В.Г. Котик. – М.: Недра, 1975. – 288 с.
3. Притула, В.В. Подземная коррозия трубопроводов и резервуаров / В.В. Притула. – М.: Акела, 2003. – 225 с.
4. Трубопроводный транспорт нефти: учеб. для вузов: в 2 т. / Г.Г. Васильев [и др.]; под ред. С.М. Вайнштока. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2002. – Т. 1. – 407 с.
5. Аварийно-восстановительный ремонт магистральных нефтепроводов / А.Г. Гумеров [и др.]; под ред. А.Г. Гумерова. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 1998. – 271 с.
6. Коррозия и защита оборудования от коррозии: учеб. пособие / Г.Н. Мальцева [и др.]; под ред. С.Н. Виноградова. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2000. – 211 с.
7. Защита трубопроводов от коррозии: учеб. пособие / Ф.М. Мустафин [и др.]; под ред. Ф.М. Мустафина. – СПб.: ООО «Недра», 2005. – Т. 1. – 620 с.
8. Костюченко, А.А. Механизмы реализации коррозионных процессов на магистральных нефтепроводах / А.А. Костюченко, В.В. Воробьев // Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта: материалы V междунар. науч.-техн. конф. – Новополоцк: УО «ПГУ», 2006. – С. 60 – 61.
9. Розенфельд, И.Л. Ускоренные методы коррозионных испытаний металлов (теория и практика) / И.Л. Розенфельд, К.А. Жиганова. – М.: Металлургия, 1966. – 348 с.

Поступила 03.06.2010

#### CHANGE OF CORROSION SITES ANNULAR WELD PIPELINES WHICH HAVE UNDERGONE LONG-TERM OPERATION WITH THE INFLUENCE OF TEMPERING

A. YANUSHONOK, A. SNARSKIJ

*Age of the linear part of the system of transportation of liquid and gaseous hydrocarbon energy in Belarus exceeds the designated lifetime, or close to it. In the operation of the pipe steel flow processes of damage accumulation, and aging result in embrittlement of the pipe material. Particularly strong this effect is manifested in a structurally heterogeneous areas, which are welded connections. One of the methods of recovery viscoplastic properties of the pipe material is a high-temperature thermal effects. At the same time there are no studies on the impact of this method on other operating properties. The article deals with the influence of tempering on corrosion sites annular weld pipelines which have undergone long-term operation.*