

## **ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА ВЫСОКОПРОЧНЫХ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ НА ПОКАЗАТЕЛИ ИХ СТОЙКОСТИ ПРОТИВ КРН**

**В.П.Горбатенко (ДонНТУ, г. Донецк), В.М.Дорохин, В.В. Бурховецкий (Компания «Астра-Стайл», г. Донецк)**

*Обсуждается зависимость характеристик стойкости против коррозионного растрескивания под напряжением от показателей механических свойств и структуры высокопрочных трубных сталей после контролируемой прокатки и термической обработки.*

Проблема коррозионного растрескивания, получившего в отношении разрушения трубопроводов специфическое название «коррозионное растрескивание под напряжением» (КРН, или стресс-коррозия) металла труб магистральных газопроводов является весьма актуальной из-за увеличения числа их аварий и отказов: от 40 до 72% аварий на газопроводах принято относить на счет КРН [1]. Считают, что качественная заводская изоляция труб в сочетании с соответствующим качеством изоляции монтажных стыков трубопроводов на трассе позволит практически решить проблему КРН металла труб [2]. Однако, и качество самого металла труб может оказывать влияние на стойкость против КРН.

В последние годы высказывается мнение о том, что трубы из листов контролируемой прокатки оказываются более подверженными КРН в сравнении, например, с трубами после нормализации и термического улучшения [3-5]. Однако, экспериментальных данных для убедительного обоснования этого мнения пока еще недостаточно. Известно, что при анализе условий возникновения таких трещин необходимо исходить из рассмотрения системы «сталь-среда», или, точнее, «сталь-напряжения-среда» [4]. Поэтому в условиях повышения требований к прочностным свойствам металла труб следует учитывать вероятность возможного снижения стойкости стали против КРН.

Стойкость против КРН является структурно-чувствительной характеристикой [3, 4], поэтому зависит не только от химического состава стали, но и от ее фазового и структурного состава, степени однородности структуры и свойств, характера субструктуры металла, уровня и характера распределения внутренних напряжений в изделиях.

Целью настоящей работы является анализ зависимости показателей стойкости против КРН от уровня основных контролируемых характеристик

механических свойств трубных сталей высокой прочности.

В качестве характеристики стойкости стали против КРН использовали показатель  $K\psi$ , оцениваемый как отношение величины относительного сужения образца при испытаниях в коррозионно-агрессивной среде ( $\psi_{p-p}$ ) к таковой в случае испытания на воздухе ( $\psi_{возд.}$ ), т.е.  $K\psi = \psi_{p-p} / \psi_{возд.}$ , определяемых в условиях растяжения с постоянной малой скоростью деформации.

Такие испытания были выполнены по двум методикам:

1) методике института ВНИИГАЗ<sup>2</sup>, предусматривающей испытания поперечных цилиндрических образцов типа IV (по ГОСТ 1494) с диаметром рабочей части 6 мм на машине МР 5-8В при относительной скорости деформации  $0,5 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ ; в качестве коррозионно-агрессивной среды был применен раствор ВНИИГАЗ с  $\text{pH}=5,1$ ;

2) методике ИЭС им. Патона НАН Украины<sup>3</sup>, предусматривающей испытания поперечных плоских образцов сечением 12x3 мм на специальной установке, разработанной на базе машины АИМА 5-1, при постоянной скорости движения активного захвата, обеспечивающей относительную скорость деформации не более  $1,2 \times 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ ; коррозионно-агрессивной средой являлся 0,1 М раствор  $\text{NaHCO}_3$  ( $\text{pH} \approx 9$ ) в условиях приложения потенциала, соответствующего активно-пассивному переходу.

Химический состав исследованных сталей по основным элементам приведен в таблице 1. Листы были прокатаны по технологии контролируемой прокатки, обеспечившей в данном случае получение близкого уровня прочностных характеристик (см. табл. 2). Это позволяет сравнивать показатели стойкости против КРН в зависимости от уровня значений механических характеристик в пределах сопоставимых категорий прочности.

Таблица 1 – Химический состав исследованных сталей, % масс.

№ состава	Марка стали	C	Mn	Si	S	P	Ti	Al	V	Nb
1	10Г2ФБ	0,11	1,64	0,37	0,002	0,018	0,018	0,031	0,080	0,052
2	10Г2ФБ	0,11	1,70	0,25	0,005	0,020	0,023	0,034	0,094	0,023
3	09Г2ФБ	0,11	1,52	0,23	0,006	0,021	0,020	0,031	0,073	0,028
4	X70	0,08	1,62	0,27	0,004	0,015	0,016	0,036	0,078	0,041
5	X70	0,12	1,57	0,32	0,002	0,017	0,013	0,030	0,007	0,046

Примечание: Производители листов: состав №1 – ОАО «ММК им.Ильича», составы №№2-4 – ОАО «МК «Азовсталь», состав №5 – импортная поставка (Австрия).

<sup>2</sup> - Испытания выполнены при консультациях и непосредственном участии к.т.н. Антонова В.Г. и к.ф.-м.н. Яковлева С.Е., институт ВНИИГАЗ;

<sup>3</sup> - Испытания выполнены при консультациях и непосредственном участии д.х.н. Полякова С.Г., ИЭС им. Патона НАН Украины.

Таблица 2 – Средние значения показателей механических свойств исследованных сталей

№ сост.	Марка стали	$\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_{0,2}$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\delta_2$ , %	KCV <sup>-20</sup> , Дж/см <sup>2</sup>	KCV <sup>-60</sup> , Дж/см <sup>2</sup>	KCU <sup>-60</sup> , Дж/см <sup>2</sup>
1	10Г2ФБ	642	552	40,2	140	87	145
2	10Г2ФБ	607	504	39	106	44,5	125
3	09Г2ФБ	590	488	42	148	112	195
4	X70	615	545	40,0	224	145	222
5	X70	597	494	39,0	289	154	322

С учетом пока еще ограниченных возможностей реализованных методик ускоренных испытаний образцов на склонность сталей к КРН обсуждаемые ниже результаты следует рассматривать, прежде всего, в аспекте возможных тенденций влияния уровня соответствующей характеристики механических свойств стали на ее склонность к коррозионному растрескиванию под напряжением.

Приведенные на рисунке 1 данные свидетельствуют о том, что в случае испытаний как в слабокислой среде (методика ВНИИГАЗа), так и в щелочной среде (методика ИЭС им. Патона) наблюдается достаточно четко выраженная тенденция к снижению принятого показателя стойкости против КРН ( $K_{\psi}$ ) с повышением прочностных характеристик стали.

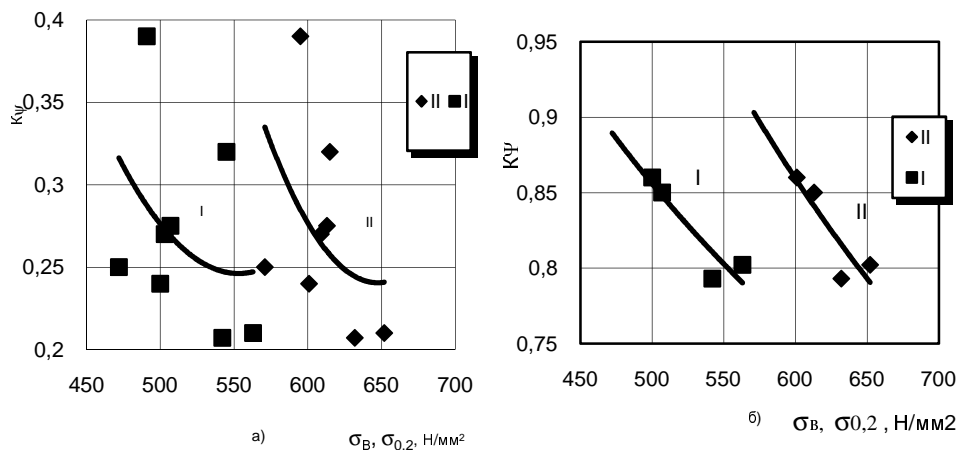


Рисунок 1 - Влияние изменения величины  $\sigma_{0,2}$  (I) и  $\sigma_B$  (II) на показатель стойкости против КРН ( $K_{\psi}$ ) высокопрочных трубных сталей при испытаниях по методикам ВНИИГАЗ (а) и ИЭС им. Патона (б)

Следовательно, повышение прочностных характеристик стали за-

данного химического состава путем снижения температуры окончания контролируемой прокатки листов на стане может привести к увеличению склонности к КРН металла труб большого диаметра вследствие повышения уровня остаточных внутренних напряжений. Несколько неожиданным оказался характер зависимости показателей стойкости сталей против КРН от результатов испытаний на ударный изгиб поперечных образцов (рисунок 2).

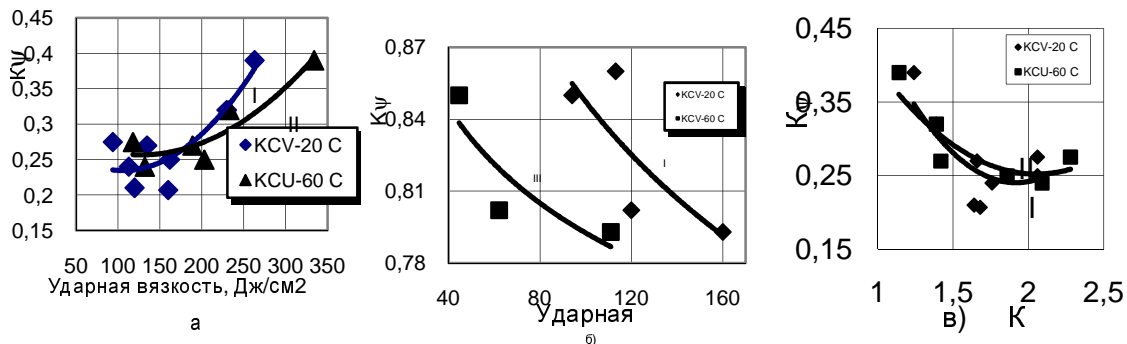


Рисунок 2 - Зависимость показателя стойкости против КРН ( $K\psi$ ) высокопрочных трубных сталей от показателей ударной вязкости (а, б) и от коэффициента анизотропии показателей ударной вязкости высокопрочных трубных сталей при испытаниях по методикам ВНИИГАЗ (а, в) и ИЭС им. Патона (б): 1 - KCV<sub>-20°C</sub>, 11 - KCU<sub>-60°C</sub>, 111 - KCV<sub>-60°C</sub>.

Так, повышение значений показателей ударной вязкости приводило к заметному снижению показателя стойкости стали против КРН ( $K\psi$ ), определенного по методике ИЭС им. Патона (см. рис. 2, б). Повышение ударной вязкости в определенных пределах (KCV<sub>-20°C</sub> – до 160...165 Дж/см<sup>2</sup>, KCU<sub>-60°C</sub> – до 190...200 Дж/см<sup>2</sup>) не приводило к росту показателя  $K\psi$ , определенного по методике института ВНИИГАЗ (см. рис. 2,а). Наиболее высокие значения как показателей ударной вязкости, так и величины  $K\psi$  были получены при испытаниях стали X70 составов №№ 4 и 5, имеющей относительно невысокие прочностные характеристики (см. табл. 2). Следовательно, влияние зеренной и субзеренной структуры феррита, как основной структурной составляющей малоперлитных сталей, определяющей характеристики ее вязкости, на стойкость металла труб против КРН, очевидно, должно стать объектом углубленных исследований. Ранее уже высказывалось мнение о том, что различия в строении металла даже в его микрообъемах могут быть одной из причин снижения стойкости стали против КРН [3, 4].

Известно, что для структуры сталей контролируемой прокатки характерна структурная неоднородность, прежде всего, структурная полос-

чатость, степень проявления которой возрастает с понижением температуры конца прокатки. Кроме этого, наблюдается эффект вытягивания зерен феррита вдоль направления прокатки, который также усиливается при снижении температуры конца прокатки. Это вызывает анизотропию механических свойств стали, наиболее сильно выраженную в отношении показателей ударной вязкости при отрицательных температурах испытаний [6]. Анализ данных, приведенных на рисунке 2, в, свидетельствует о том, что повышение степени анизотропии показателей ударной вязкости высокопрочных трубных сталей оказывает отрицательное влияние на стойкость сталей против КРН. Следовательно, повышение степени изотропности свойств стали в листах и готовых трубах является одним из перспективных направлений снижения вероятности отказа газопроводов по причине возникновения магистральных трещин, в том числе и трещин КРН.

Как и следовало ожидать, повышение пластических характеристик стали, определяемых в процессе стандартных испытаний металла листов и труб в ходе сдаточных испытаний продукции, способствует увеличению показателей ее стойкости против КРН (рисунок 3).

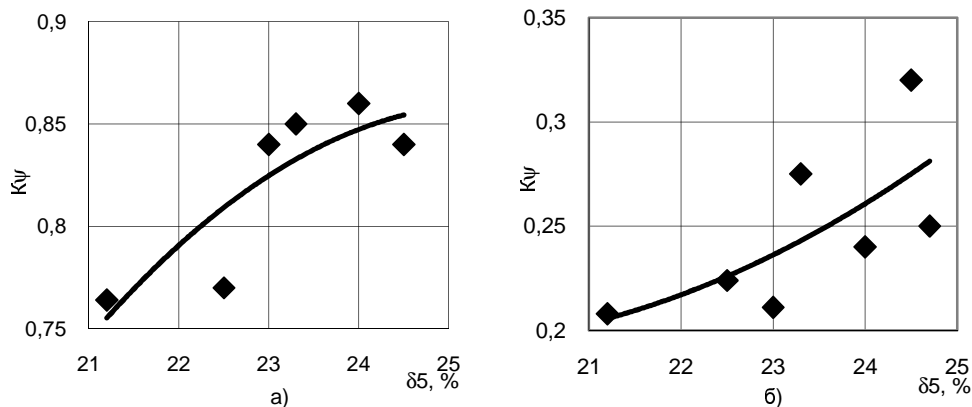


Рисунок 3 - Зависимость показателей стойкости стали против КРН ( $K\psi$ ), определяемых по методике ИЭС им. Патона (а) и ВНИИГАЗ (б) от величины относительного удлинения  $\delta_5$ .

При сопоставлении величины пластических характеристик стали, прежде всего, показателей ее относительного сужения, и стойкости металла против КРН следует учитывать специфику определения величины  $K\psi$ , представляющей собой отношение значений относительного сужения образцов, испытанных в коррозионно-активной среде  $\psi_{p-p}$ , и на воздухе  $\psi_{возд}$  в условиях их медленного нагружения. Следовательно, благоприятного влияния возрастания величины относительного сужения в ходе сдаточных испытаний и в условиях медленного нагружения в воздушной атмосфере на повышение величины  $K\psi$  следует ожидать лишь в случае более значи-

тельного роста при этом значений  $\psi$  в процессе испытания в коррозионно-активной среде ( $\psi_{p-p}$ ). Анализ результатов испытаний образцов высокопрочных трубных сталей на стойкость против КРН показал, что показатель  $K_{\psi}$  увеличивался прямо пропорционально росту величины относительного сужения образцов при испытаниях на воздухе (рисунок 4).

Полученные зависимости подтверждают вывод о том, что повышение пластических характеристик стали является эффективным методом увеличения показателей ее стойкости против КРН. Расчеты, выполненные с использованием полученных зависимостей, показывают, что показатель  $K_{\psi}$  будет удовлетворять требованиям, характеризующим низкую склонность высокопрочной стали к КРН, если величина относительного сужения поперечного сечения при испытаниях на воздухе будет превышать 60...63%.

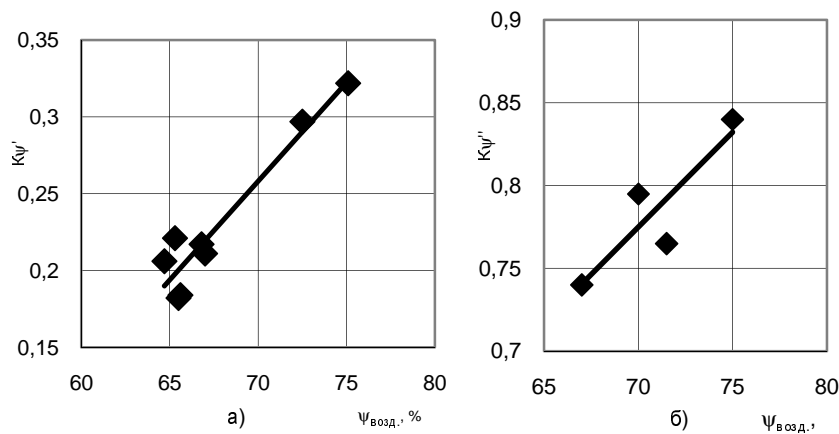


Рисунок 4 - Зависимость показателей стойкости стали против КРН ( $K_{\psi}$ ), определяемых по методике ВНИИГАЗ (а) и ИЭС им.Патона (б) от величины относительного сужения при испытаниях на воздухе ( $\psi_{\text{возд.}}$ )

С учетом перспектив производства термически обработанных труб большого диаметра нами были проведены предварительные исследования изменения показателя  $K_{\psi}$ , определяемого по методике института ВНИИГАЗ от условий деформационно-термической обработки, результаты которых приведены в таблице 3.

Термическую обработку листов из стали Х70 в условиях ОАО «Металлургический комбинат «Азовсталь» и образцов из стали 10Г2ФБ (состав 1, табл.1) в лабораторных условиях выполняли после контролируемой прокатки листов по принятой на комбинате технологии. Причем, в случае термической обработки листов образцы для испытаний вырезали из одного и того же листа до и после его обработки. Образцы же для их термической обработки вырезали из одного темплета. Нагрев под закалку, нормализацию и изотермический отжиг проводили до 920-935 °С. Результаты этих

исследований в целом подтверждают высказанное ранее мнение о том, что упрочнение стали и снижение ее пластических характеристик могут быть серьезной причиной снижения ее стойкости против КРН.

Релаксационный отжиг после контролируемой прокатки, способствуя снижению уровня остаточных напряжений, плотности дислокаций и очевидно, частичной рекристаллизации феррита, образовавшегося еще во время деформации, должен приводить к снижению склонности стали к КРН, что проявилось в увеличении значения  $K_{\psi}$  (см.табл. 3).

Таблица 3 – Сравнительные значения механических свойств и показателя стойкости против КРН ( $K_{\psi}$ ) сталей после контролируемой прокатки и термической обработки; результаты испытаний поперечных образцов

Марка стали (состав)	Объект термической обработки	Вид обработки	$K_{\psi}$	$\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_{0,2}$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %
Х70 (4)	Лист	К.п.	0,32	615	545	24,0	69,0
		К.п.+з+в.о.(650 °С)	0,48	575	495	27,5	73,0
10Г2ФБ (1)	Цилиндрические образцы диаметром 6 мм	К.п.	0,21	669	556	24,5	64,1
		К.п.+р.о. (600 °С)	0,26	663	572	23,6	65,6
		К.п.+з.+р.о. (600 °С)	0,22	749	678	19,3	74,1
		К.п.+и.о. (600 °С)	0,27	527	424	33,3	72,8
		К.п.+Н	0,15	616	510	26,7	65,3

Примечания: К.п. – контролируемая прокатка, з – закалка, в.о. - высоко-температурный отпуск, р.о. - релаксационный отжиг, и.о. – изотермический отжиг.

Достаточно высокие значения показателя  $K_{\psi}$  были обеспечены реализацией после контролируемой прокатки изотермического отжига, обеспечившего получение весьма высоких пластических характеристик, но пониженных прочностных свойств стали. Нормализация образцов не обеспечила повышения величины показателя  $K_{\psi}$  в сравнении с контролируемой прокаткой. Это обусловлено формированием при ускоренном охлаждении образцов диаметром 6 мм смешанной феррито-перлитно-бейнитной структуры, сохранившей признаки структурной неоднородности.

Анализ результатов исследования высокопрочных сталей, подвергнутых после контролируемой прокатки термическому улучшению, позволяет сделать предположение о том, формирование структуры сорбита отпуска может быть желательным в целях повышения стойкости металла труб против КРН (см. табл.3).

Основными причинами повышения показателя  $K_{\psi}$  в стали после

термического улучшения в сравнении с таковым в металле контролируемой прокатки можно считать следующие:

- получение достаточно однородной в макро- и микрообъемах структуры стали со слабо выраженными признаками ее ориентированности; это обеспечивает весьма высокую степень изотропности ее механических свойств, в частности, коэффициентов анизотропии изученных показателей ударной вязкости при отрицательных температурах в пределах 1,10 – 1,22 в сравнении с интервалом их значений 1,26 – 1,83, полученных при испытаниях той же стали непосредственно после контролируемой прокатки;
- снижение уровня остаточных макронапряжений (в 2...2,5 раза) и напряжений II рода (в 1,5...2 раза) в сравнении с их уровнем в стали контролируемой прокатки;
- повышение пластичности и вязкости стали.

В литературе мало сведений о влиянии структурных характеристик стали на ее стойкость против КРН. Однако, на наш взгляд, управляемое воздействие на структуру металла листов и труб на стадии их производства должно стать основным направлением деятельности по устранению возможного неблагоприятного влияния отдельных металлургических факторов на стойкость металла против КРН. Можно полагать, что повышение уровня внутренних напряжений, в том числе и в результате субструктурного упрочнения, увеличение степени макро- и микроструктурной неоднородности, развитие процессов выделения частиц упрочняющих фаз и старения могут стать причиной некоторого снижения стойкости металла труб против КРН.

В последние годы со стороны основных потребителей труб большого диаметра из высокопрочных сталей наметилась четко выраженная тенденция формирования повышенных требований по прочностным характеристикам металла листов и труб при существенном ограничении верхнего допустимого предела содержания элементов – упрочнителей: углерода, марганца, кремния и микролегирующих добавок (Nb, V, Ti). Это объясняют необходимостью улучшения свариваемости стали. Однако, такой подход оставляет металлургам – производителям листов, работающим с использованием схемы контролируемой прокатки с последеформационным охлаждением на воздухе, лишь один путь решения задачи повышения прочностных характеристик трубных сталей, а именно, ужесточение температурно-деформационных параметров прокатки на ее заключительной стадии, прежде всего, чрезмерное снижение температуры окончания деформации. Это неизбежно приведет к снижению показателей пластичности стали, повышению степени анизотропии механических свойств и увеличению уровня остаточных внутренних напряжений, что, очевидно, чревато



снижением стойкости металла труб против КРН.

Реализация контролируемой прокатки при более высоких температурах в сочетании с ускоренным последеформационным охлаждением, очевидно, может рассматриваться в качестве более предпочтительной технологии производства толстых листов для изготовления электросварных газопроводных труб из сталей повышенных категорий прочности при условии обеспечения достаточно равномерного охлаждения листов. Однако, при реализации такой технологии также следует учитывать и дополнительно исследовать возможность увеличения уровня внутренних напряжений, прежде всего из-за необходимости более интенсивного последеформационного охлаждения стали с пониженной устойчивостью деформированного аустенита, характеризующегося высокой плотностью дефектов кристаллического строения [7], что также может оказать отрицательное влияние на сопротивление металла труб коррозионному растрескиванию под напряжением. Следовательно, выбор состава стали и технологических параметров контролируемой прокатки листов для изготовления труб ответственного назначения следует осуществлять не только исходя из обеспечения, прежде всего повышенных прочностных характеристик металла, но и с учетом необходимости повышения сопротивления материала труб специфическому виду замедленного разрушения в процессе эксплуатации, каковым является коррозионное растрескивание под напряжением.

Очевидно, в плане повышения эксплуатационных характеристик трубопроводов не следует исключать из рассмотрения возможность и эффективность термической обработки труб на трубных заводах. Упрочняющая термическая обработка (закалка + высокотемпературный отпуск) может стать эффективным методом повышения эксплуатационных характеристик труб, в том числе и стойкости стали против КРН при обеспечении необходимого уровня прочностных, пластических и вязких характеристик металла. Такая обработка может стать перспективной для труб, используемых для строительства трубопроводов, прокладываемых в наиболее сложных геолого-климатических условиях.

Таким образом, склонность металла труб к коррозионному растрескиванию под напряжением может изменяться в зависимости от технологических параметров деформационно-термической обработки в металлургическом цикле производства листов и труб. Дополнительное упрочнение стали заданного химического состава путем снижения температуры прокатки в чистовой клетке листопрокатного стана может привести к снижению показателей ее стойкости против КРН, определяемых по существующим методикам. Причинами этого могут быть повышение степени структурной неоднородности, вызывающей усиление анизотропии механических свойств стали, увеличение уровня внутренних напряжений в листах и

готовых трубах, усиление степени микроэлектрохимической неоднородности сплава. Повышение пластических характеристик стали должно способствовать увеличению ее стойкости против КРН. Однако, повышение показателей ударной вязкости стали может не вызывать увеличения стойкости металла труб против замедленного разрушения в процессе КРН.

### **Литература**

1. Анализ аварийности газопроводов ОАО "Газпром" по причине КРН /В.В.Салюков, М.Ю.Митрохин, С.В.Карпов и др.// В кн.: Материалы совещания ОАО "Газпром" "Опыт эксплуатации и технической диагностики магистральных газопроводов с дефектами КРН" /Часть 1. – М.: ООО "ИРЦ Газпром".– 2002.– С.3-16.
2. Тухбатуллин Ф.Г., Галиуллин З.Т. Результаты работ ООО "ВНИИГАЗ" по проблеме КРН // В кн.: Материалы совещания ОАО "Газпром" "Опыт эксплуатации и технической диагностики магистральных газопроводов с дефектами КРН" /Часть 1. – М.: ООО "ИРЦ Газпром".– 2002.– С.17-22.
3. Кантор М.М. Разработка сталей стойких к КРН// В кн.: Материалы совещания ОАО "Газпром" "Опыт эксплуатации и технической диагностики магистральных газопроводов с дефектами КРН" /Часть II. – М.: ООО "ИРЦ Газпром".– 2002.– С.37 - 44.
4. Стеклов О.И. Стойкость материалов и конструкций к коррозии под напряжением.– М.: Машиностроение, 1990.– 384 с.
5. Коррозионные повреждения на магистральных газопроводах / Ю.А.Теплинский, М.А.Конакова, А.В.Борщевский и др. // Газовая промышленность.– 2001.- №5.- С.32-36.
6. Оценка анизотропии механических свойств и трещиностойкости листов и труб большого диаметра / В.М.Дорохин, В.П.Горбатенко, Ю.Д.Морозов, и др. / Сталь.– 2001.- №1.– С.65-69.
7. Проблемы совмещения горячей деформации и термической обработки стали / А.А.Баранов, А.А.Минаев, А.Л.Геллер, В.П.Горбатенко. – М.: Металлургия, 1986. –129 с.

**© Горбатенко В.П., Дорохин В.М., Бурховецкий В.М. 2007**