

К 70-летию
ФТИ
НАНБ

ОСТАТОЧНЫЙ РЕСУРС СТАЛЬНЫХ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

С. КРАСНЕВСКИЙ,
начальник
лаборатории ФТИ НАНБ,
кандидат технических наук



Начиная с 1980 года в ФТИ НАНБ проводятся фундаментальные и прикладные исследования остаточной прочности и остаточного ресурса высоконагруженных стальных конструкций после длительной (20 лет и более) эксплуатации, которые включают научные [1(3)], нормативно-методические [4(7)] и инженерные разработки [8, 9].

Научная основа оценки и расчета остаточного ресурса представляет исследования и разработку механики накопления повреждений, моделей и критериев предельного состояния конструкции при различных видах нагружения. Основные конструкции, для которых разрабатывалось это направление, представляют собой тонкостенные цилиндрические оболочки (трубопроводы и сосуды, работающие под давлением). Учитывая, что эти объекты работают в основном в условиях квазистатического нагружения, в качестве основного повреждающего фактора принято изменение (деградация) служебных характеристик основного металла, которые определялись из испытания на растяжение и ударную вязкость, а именно: прочностных характеристик (предела текучести $\sigma_{0,2}$, предела прочности σ_B и напряжения вязкого разрыва в шейке σ_K); пластических характеристик (равномерной деформации ϵ_m и предельной деформации разрушения ϵ_K); ударной вязкости КСВ, работы зарождения трещины A_3 , работы распространения трещины A_p и температуры хрупко-вязкого перехода; удельной работы разрушения W_p ; критерия сопротивления хрупкому разрушению K_{IC} .

Известно, что процесс разрушения является многостадийным, который определяется достижением трещиной некоторых критических длин, зависящих от структу-

ры металла и уравнений баланса энергий и напряжений. Для пластичных металлов, какими являются конструкционные стали, критическим размером трещины является размер Орована:

$$l \geq l_{op} = \alpha(\gamma_{эфф} E / \sigma^2), \quad (1)$$

где l_{op} (критический размер трещины по Оровану, $\gamma_{эфф}$ - удельная поверхностная энергия образования трещины с учетом пластичности, E - модуль Юнга, σ - приложенное напряжение, коэффициент $\alpha \cong 1$).

Оценка критической трещины по Оровану в зависимости от пластичности металла дает размеры: $l_{op} \cong 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м} \div 0,5 \text{ м}$ (ожидаемые критические размеры трещины в трубных сталях).

Основным критерием сопротивления хрупкому разрушению при статическом нагружении является вязкость разрушения:

$$K = \sigma \sqrt{\pi \cdot l} \leq K_{IC}, \quad (2)$$

где l (длина трещины, K_{IC} - трещиностойкость.

Стандартизированные испытания по определению K_{IC} достаточно сложны, особенно для сталей средней прочности и достаточно высокой пластичности (трубные и котельные стали).

В ФТИ НАНБ начиная с 1985 г. разрабатывается метод определения K_{IC} по испытаниям механических свойств при растяжении гладких и надрезанных (с наведенным концентратором) образцов.

Метод основан на концепции Л. Жильмо [10], что поглощенная при деформации удельная предельная энергия W является фундаментальной характеристикой сопротивления материала разрушению. Пренебрегая энергией упругой деформации и энергией, необходимой для движения трещины, удельную предельную работу разрушения при растяжении образца можем представить в виде

$$W_p = \int_0^{\epsilon} \sigma_i(\epsilon) d\epsilon, \quad (3)$$

где σ_i - интенсивность напряжений.

Следовательно, удельную работу пластического разрушения W_p можно определить из испытаний на растяжение гладкого и надрезанного (с наведенным концентратором) образцов по кривой интенсивности напряжений (деформация сдвига (для заданной температуры и скорости нагружения).

Учитывая формулы (1), (2) и (3) и считая, что $\gamma_{эфф} = W_p \cdot L$, где L - размер зоны с предельной плотностью энергии деформации в направлении приложенного растягивающего напряжения ($L \cong 10^{-3} \text{ м}$), получим, что трещиностойкость K_{IC} может быть определена через удельную работу разрушения:

$$K_{IC} = \beta(\pi W_p L \cdot E)^{1/2} \quad (4)$$

где β - коэффициент, зависящий от граничных условий задачи.

Следовательно, трещиностойкость материала определяется единственной, но комплексной характеристикой материала - удельной работой разрушения.

Потому обосновано можно принять характеристику W_p за прогнозный параметр надежности и работоспособности материала при оценке остаточного ресурса высоконагруженных стальных конструкций.

Были проведены обширные экспериментальные исследования по влиянию длительности эксплуатации на основные механические характеристики металла стальных конструкций, а именно: сосудов, работающих под давлением, и магистральных газо-нефтепродуктопроводов. В качестве фактора, нормирующего условия эксплуатации различных конструкций, принимался безразмерный параметр нагруженности $0 \leq \omega \leq 1$ основного металла сосуда или трубопровода, который определялся выражением:

$$\omega = \frac{\sigma_i}{\sigma_{0,2}} \approx \frac{P(De-t)}{2tR_2^H}, \quad (5)$$

где P - среднее рабочее давление продукта за отработанный ресурс;

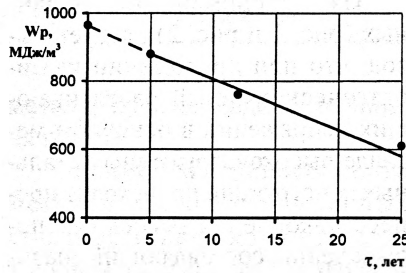
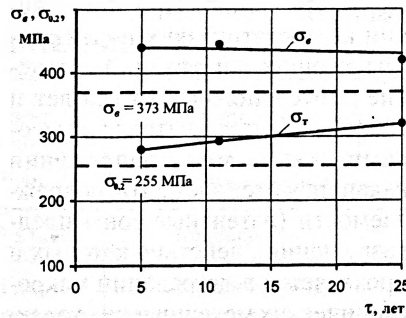
De, t - наружный диаметр и толщина стенки сосуда или трубопровода;

R_2^H - нормативный (минимальный) предел текучести металла исследуемой конструкции.

Так как известно [1], что предельная пластичность металла зависит от показателя жесткости напряженного состояния, то учитывался также и этот показатель, определяемый по выражению:

$$\sigma_* = \frac{\sigma_0}{T}, \quad (6)$$

где σ_0 - среднее напряжение;



T - интенсивность касательных напряжений.

На рис. 1 приведены результаты исследования механических свойств основного металла по вырезанным темплетам из однотипных сосудов давления, работающих в одинаковых условиях эксплуатации с различной длительностью.

Как следует из рис. 1, a характеристики прочности $\sigma_{0,2}$ и σ_B остались примерно на том же уровне, что и в начале эксплуатации, т.е. формально по классическим теориям прочности, основанным на соотношении $\sigma \leq [\sigma]_{доп.}$,

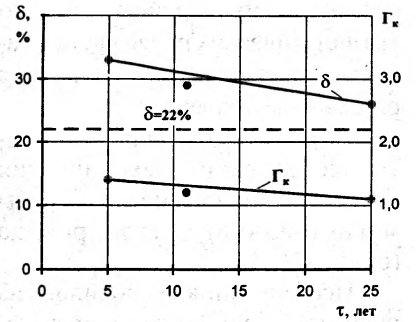
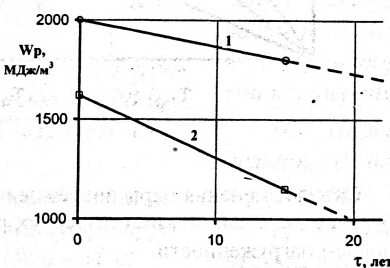
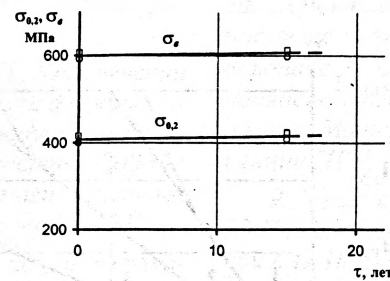


Рис. 1

Влияние длительности нагружения двухосным растягивающим напряженным состоянием $\sigma_2 / \sigma_1 = 0,5$ при уровне нагруженности $\omega = 0,32$ и показателе жесткости $\sigma_* = 1,0$ на изменение механических и вязких свойств стали 3сп:

- a - характеристики прочности;
- b - характеристики пластичности;
- ϵ - удельная работа разрушения.

сосуды сохранили остаточную прочность и даже несколько ее улучшили.

С другой стороны, пластические показатели (рис. 1, b) имеют стабильную тенденцию снижения при увеличении длительности эксплуатации как для относительного удлинения δ , так и для предельной пластичности Γ_K .

Удельная работа разрушения W_p (рис. 1, ϵ) и, следовательно, трещиностойкости также существенно уменьшается с увеличением длительности (от 5 до 25 лет) эксплуатации. Все это свидетельствует о том, что в материале в процес-

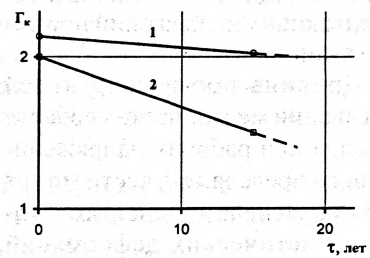


Рис. 2

Влияние длительности нагружения двухосным растягивающим напряженным состоянием $\sigma_2 / \sigma_1 = 0,3$ при уровне нагруженности $\omega = 0,64$ и показателе жесткости $\sigma_* = 0,82$ на изменение механических и вязких свойств стали 17Г1С:

- a - характеристики прочности;
- b - характеристики пластичности;
- ϵ - удельная работа разрушения;
- 1 - вдоль оси трубы;
- 2 - поперек оси трубы.

се длительного воздействия на него квазистатических полей растягивающих напряжений накапливаются рассеянные повреждения.

На рис. 2 приведены результаты исследования механических свойств основного металла трубы магистрального газопровода (сталь 17Г1С).

Исследования проводились на образцах, вырезанных в двух направлениях: вдоль оси трубы и поперек оси трубы (это направление перпендикулярно направлению прокатки листа, и в этом же направлении при эксплуатации газопровода действуют максимальные растягивающие рабочие напряжения).

Анизотропия механических свойств, изначально присутствующая в металле трубы запаса ($\tau=0$) сохранилась и усилилась в металле трубы после 15-летней эксплуатации. Закономерности изменения механических свойств соответствуют тенденциям рис.1. Прочностные характеристики $\sigma_{0,2}$ и σ_s мало чувствительны к длительности воздействия квазистатической нагрузки (рис. 2, а). Пластические характеристики (рис. 2, б) и удельная работа разрушения (рис. 2, в) имеют стабильную тенденцию к уменьшению при возрастании длительности эксплуатации, причем направление, в котором происходит наибольшая деградация механических свойств материала, совпадает с направлением действия максимальных растягивающих напряжений при эксплуатации.

Причина прогрессирующей деградации механических свойств металла при рабочих напряжениях ниже предела текучести может быть объяснена градиентами упруго-пластических деформаций на различных неоднородностях структуры (границы зерен, включения и др. несовершенства).

Фактически при нагружении реального сплава в элементе материала возникает сложный рельеф микронапряжений с высокими пиками и провалами, средняя величина которых соответствует макроскопическому (номинально-

му) напряжению. При приложении квазистатических полей растягивающих напряжений в течение длительного срока (20 лет и более) в областях металла с высокими пиками микронапряжений накапливаются элементы повреждаемости (латентные зоны предразрушения), действие которых и проявляется в деградации макроскопических механических характеристик металла.

Из экспериментальных данных (рис. 1 и рис. 2) следует вывод, что при приложении квазистатических полей растягивающих напряжений в основном металле высоконагруженных стальных конструкций происходит процесс накопления рассеянных повреждений, составляющий значительную часть общего ресурса, и предшествующий моменту образования и развития стартовой магистральной трещины, т.е. если в конструктивном элементе отсутствовала врожденная макроскопическая трещина, то образование первой макроскопической трещины является результатом накопления предельного уровня рассеянных повреждений.

В качестве меры поврежденности при длительном воздействии на металл квазистатических растягивающих напряжений принята скалярная величина

$$P(\tau) = 1 - \frac{W_p(\tau)}{W_0(\tau_0=0)}, \quad (7)$$

где $W_p(\tau)$ (поглощенная удельная работа разрушения металла для текущего момента времени эксплуатации τ ;

$W_0(\tau_0=0)$ (удельная работа разрушения металла в начальный момент эксплуатации $\tau_0=0$).

Время до исчерпания ресурса (до разрушения) $\tau_{пр}$ определим, решив обратную краевую задачу для уравнения (7) с граничными условиями: $P(\tau_0=0) = 0$; $P_{пр}(\tau_p) = 1$ [11]. Здесь значение $P(\tau_0=0) = 0$ соответствует случаю, когда повреждения отсутствуют, значение $P_{пр}(\tau_p) = 1$ соответствует уровню повреждений, при котором металл выработал свой ресурс, т.е. моменту образования макроскопической трещины.

На рис. 3 показана схема изменения меры поврежденности $P(\tau)$ в зависимости от длительности приложения нагрузки (фактически от ресурса). При построении схемы принято, что мера поврежденности возрастает по линейному закону с увеличением длительности приложения нагрузки. Скорость накопления повреждений (угол наклона прямых 1, 2, 3) определяется уровнем нагруженности, и с увеличением параметра ω скорость накопления повреждений возрастает, т.е. $\frac{\partial P}{\partial \tau} \sim \omega$ и для прямых 1, 2 и 3 параметр нагруженности по (5) будет $\omega_1 > \omega_2 > \omega_3$.

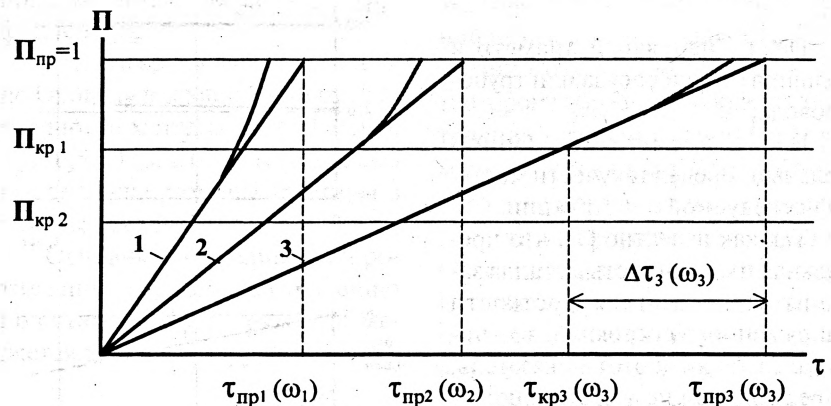


Рис.3

Схема изменения меры поврежденности в металле в зависимости от длительности воздействия квазистатических растягивающих напряжений с различным уровнем нагруженности.

УРОВНИ ЖЕЛАТЕЛЬНОСТИ

Таблица 1

Удельная работа разрушения W_p , МДж/м ³	П (накопленная поврежденность)	Конструкционная надежность металла по трещиностойкости
$2000 \leq W_p$	$0 < П \leq 0,15$	Очень хорошая
$1500 \leq W_p < 2000$	$0,15 < П \leq 0,30$	Хорошая
$800 \leq W_p < 1500$	$0,30 < П \leq 0,45$	Удовлетворительная
$300 \leq W_p < 800$	$0,45 < П \leq 0,65$	Предкритическая
$W_p < 300$	$0,65 < П \leq 1,0$	Критическая

Учитывая, что при расчете остаточного ресурса должен быть запас по предельному состоянию материала и имеет место статистический разброс механических характеристик, критическая длительность эксплуатации металла под нагрузкой должна определяться по допускаемой поврежденности $P_{кр}$, которая зависит от приложенного уровня нагруженности ω и уровня риска разрушения конструкции, т.е. рассчитанный остаточный ресурс должен обеспечивать вероятность разрушения по деградации служебных свойств

металла не выше заданного уровня риска.

Оценку работоспособности металла высоконагруженных стальных конструкций при длительном воздействии нагрузки можно произвести по таблице 1.

Из проведенного в ФТИ НАНБ цикла работ следует, что работоспособность и надежность (в т.ч. и остаточный ресурс) высоконагруженных стальных конструкций (магистральных газопроводов, нефтепроводов и сосудов, работающих под давлением) при квази-

статической нагрузке определяется взаимосвязью следующих основных параметров безопасности:

- уровнем дефектности (представленным типами, количеством, размерами и геометрией дефектов);

- фактическим (на момент обследования) состоянием основного металла и металла сварных соединений (представленным в терминах прочности и пластичности и, в первую очередь, удельной работы разрушения и трещиностойкости);

- напряженно-деформированным состоянием элементов конструкции и в зоне дефектов (представленным в терминах напряжений и деформаций).

Итогом этих работ является назначенный остаточный ресурс основного металла (конструкционная надежность по трещиностойкости), который обеспечивает работоспособность стальной конструкции с заданным уровнем надежности в интервале времени до следующей диагностики технического состояния.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Красневский С.М., Макушок Е.М., Щукин В.Я. Разрушение металлов при пластическом деформировании. - Мн.: Наука и техника, 1983. - 173 с.

2. Красневский С.М., Мочернюк Н.П., Сорохан Ц.Д., Герасимчик И.И., Лазаревич Г.И. Экспериментально-аналитический расчет остаточного ресурса работы основного материала МГ/ Газовая промышленность. - 1991, №4, с. 30-32.

3. Сорохан Ц.Д., Герасимчик И.И., Красневский С.М. Методы обеспечения надежности функционирования газопроводной системы Республики Беларусь. - В кн. Десятая встреча «Диагностика-2000». Том 2 Диагностика линейной части магистральных трубопроводов. - М., ОАО «Газпром» - с.231-237.

4. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением. (МНПАГПАН-5.01.98). Мн.: ООО ПП «Асобны Дах», 1998 - 184 с.

5. Временная методика диагностики газораспределительной станции (ГРС) с целью определения ее остаточного ресурса. Мн.: ФТИ НАНБ, 1996 - 35 с.

6. Методика по оценке несущей способности магистральных газопроводов по данным внутритрубно-диагностики. Мн.: ФТИ НАНБ, 1996 - 31 с.

7. Методика технического диагностирования аккумуляторов газа ГСС-1-1-10, 0-25У-001 после пятнадцати лет эксплуатации на автомобильных газонаполнительных компрессорных станциях (АГНКС) - Мн., ФТИ НАНБ, 2000 - 48 с.

8. Красневский С.М., Яровой Г.О., Герасимчик И.И. Неразрушающий контроль состояния металла элементов газотранспортного оборудования в процессе эксплуатации на различных стадиях их фактического износа. - В кн. Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта: Материалы III научно-технической конференции ПГУ, 2000 - с. 113-118.

9. Красневский С.М., Васильков В.В., Ходаренко Ю.П., Герасимчик И.И., Короткевич В.М., Барановский А.И. Исследование технического состояния и расчет остаточной прочности корпусов пылеуловителей газа при наличии в них расслоений. - В кн. Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта: Материалы III научно-технической конференции ПГУ, 2000 - с. 48-52.

10. Иванова В.С. Концепция Л. Жильмо предельной удельной энергии деформации с позиций си-нергетики. // Металлы. 1989. №5. с.170-178.

11. Болотин В.В. Ресурс машин и конструкций. - М.: Машиностроение, 1990. - 448 с.