ISSN: 0368-0797. Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2019. Том 62. № 1. С. 25 – 33. © 2019. Скуднов В.А., Сафронов А.С., Хлыбов А.А.

УДК:669.017::539.375:620.92.7

ОЦЕНКА СТРУКТУРНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПРЕДЕЛЬНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ К СРОКУ ЭКСПЛУАТАЦИИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ С ПОМОЩЬЮ КОМПЛЕКСНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ РАЗРУШЕНИЯ СИНЕРГЕТИКИ

*Скуднов В.А.*¹, д.т.н., профессор кафедры «Металловедение, термическая и пластическая обработка металлов»

Сафронов А.С.², главный сварщик (safronov_ne@mail.ru) Хлыбов А.А.¹, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Материаловедение, технологии материалов и термическая обработка металлов»

¹ Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (603022, Россия, Нижний Новгород, ул. Минина, 24) ² AO «Транснефть – Подводсервис» (603152, Россия, Нижний Новгород, ул. Ларина, 19-А)

Аннотация. Представлен обзор существующих известных гипотез и теорий, описывающих предельное состояние металла. Даны описания процессам, происходящим в металлах при приложенном напряжении (нагрузки). Описаны фазы процесса разрушения в структуре деформированного поликристалла. Представлено уравнение, связывающее предельную деформацию металла до разрушения со всеми характеристиками, определяющими его предельное состояние. Показаны уравнения комплексных двух и трех параметрических энергетических критериев разрушения, таких как энергоемкость, а также критерии зарождения трещин, распространения трещин, хрупкости и масштаба. Критерии разрушения могут быть применены для оценки качества структур и работоспособности металлов при эксплуатации магистральных трубопроводов. В качестве примера рассмотрен расчет критериев разрушения для конкретных образцов из стали Х70, отобранных из аварийных труб, бывших в эксплуатации 20 и 24 года, а также действующего магистрального трубопровода, бывшего в эксплуатации 5 лет. Выполнен сравнительный анализ значений комплексных критериев разрушения магистральных трубопроводов из стали Х70 после различного срока эксплуатации. Механические (прочностные) характеристика стали Х70 магистральных трубопроводов в процессе эксплуатации (после 5, 20 и 24 лет эксплуатации) практически не изменились. Изменение характеристик, определяемых по критериям разрушения, направлены в сторону их снижения от 21 до 48,5 %, причем наибольшее изменение наблюдается у критерия распространения трещин и у критерия хрупкости. Показана одинаковая природа зарождения трещин для всех классов сталей, лежащая на мезоуровне. Под действием эксплуатационных нагрузок энергоемкость, т.е. способность металла противостоять любым нагрузкам с увеличением срока эксплуатации, значительно снижается, что подтверждается изменением рассмотренных критериев разрушения. Показано, что критерии разрушения могут быть использованы для прогнозирования работоспособности сталей трубопроводов после длительной эксплуатации.

Ключевые слова: предельное состояние металлов, предельная деформация до разрушения, релаксация внутренних напряжений, энергоемкость, энергетические критерии разрушения, критерий зарождения трещин, критерий распространения трещин, критерий хрупкости, критерий масштаба.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-1-25-33

Одной из важнейших задач современной промышленности является улучшение качества продукции, повышение ее работоспособности и безотказности [1 - 4]. Наиболее распространенными стандартными характеристиками, применяемыми для оценки качества металлических материалов, являются механические свойства при статическом растяжении (σ_T , σ_B , δ , ψ) по ГОСТ 1497. Однако этих показателей оказывается недостаточно для диагностики характеристик предельного состояния металлов (ПСМ).

До конца XX в. вопрос о первичности деформации или разрушения при достижении ПСМ являлся предметом изучения. Были предложены известные гипотезы и теории ПСМ, подтверждающие ту или иную точку зрения.

Ниже приведены некоторые прогрессивные взгляды ученых на проблему.

• Академик РАН В.И. Архаров в работе «Мезоскопические явления в твердых телах» высказал мысль: «Диаграмма деформации должна давать все сведения о материале» [5].

• Профессор А.В. Степанов в статье «Роль деформации в процессе разрушения твердых тел» показал, что «Разрушить поликристаллическое тело без пластической деформации невозможно» [6].

• Профессор В.И. Владимиров в 80-х годах прошлого века показал, что оба процесса «деформация – разрушение» идут одновременно с момента приложения нагрузки до ее окончания [7]. Эти процессы разделять нельзя.

 Академик РАН Журков С.Н. предложил кинетическую теорию прочности [8], в которой показал, что при постоянной нагрузке произведение времени до разрушения τ_p на скорость пластической деформации V_p есть величина постоянная и равна показателю пластичности ψ , т.е. предельной деформации до разрушения ϵ^{npeq} :

$$\tau_{\rm p} V_{\rm p} = {\rm const} = \psi = \varepsilon^{\rm npeg}.$$
 (1)

• Профессор Л.Д. Соколов в 1961 г. высказал идею, что поведение конечной точки диаграммы деформации (т.е. предельной деформации) должно отражать закономерности поведения предельного состояния металлов.

• Академик РАН В.С. Иванова в работах [9, 10] по-казала, что

$$F = \Delta^{1/m},\tag{2}$$

где F – функция, отражающая поведение (выживание, адаптацию, приспособление, деформацию до разрушения) любой металлической системы; Δ – степень искажения структуры, лидер-дефектом которой в конструкционных деформируемых сталях является плотность дислокаций ρ_{π} (фактор дефектности); m – показатель, учитывающий факторы состояния системы (силовой, временной, энергетический).

При приложении нагрузки в металлах одновременно протекают два процесса: пластическая деформация и разрушение, которые должны характеризоваться самостоятельными показателями – сопротивлением деформации σ и сопротивлением разрушению *S*, которые преодолеваются одной и той же приложенной нагрузкой (рис. 1). Левая часть рисунка служит для расчетов стандартных механических свойств (σ_T , σ_B , δ , ψ), а правая часть должна служить для расчетов критериев разрушения (K_{3T} , K_{pT} , K_{xp} , K_{M}). При равном приложенном напряжении получим: $\sigma_T = S_T$ (предел текучести равен сопротивлению начала разрушению); $\sigma_k = S_k$ (напряжение при истинном пределе прочности σ_k равно сопротивлению разрушения S_k в конечной точке диаграммы).

В теории дислокаций показано, что величины напряжений о, деформаций є и разрыхления є_{лу} могут



 $S_{\rm H}$

Рис. 1. Диаграмма деформации металла в координатах «истинное напряжение σ – истинная деформация ε^{npen} » (*a*); диаграмма разрушения металлов «сопротивление разрушению S – степень разрыхления ε_{px} » (δ)

Fig. 1. Diagram of metal deformation in coordinates "true stress σ – true deformation $\varepsilon^{\text{npeq."}}(a)$; diagram of metal fracture "fracture strength *S* – opening degree $\varepsilon_{\sigma x}$ " (δ) быть выражены через модуль сдвига G, коэффициент α , плотность дислокаций ρ_{α} , вектор Бюргерса b, длину пробега дислокации l_{α} следующими формулами:

$$\sigma = \alpha G b \sqrt{\rho_{\pi}}; \qquad (3)$$

$$\varepsilon = b l_{\pi} \rho_{\pi}; \tag{4}$$

$$\varepsilon_{\rm px} = \frac{3}{2} \rho_{\rm g} b^2. \tag{5}$$

Во всех формулах плотность дислокаций является основным фактором напряжения, деформации и разрыхления (разрушения).

Обобщив многочисленные экспериментальные данные по пластичности металлов разной чистоты, а также экспериментальные данные по сталям и сплавам в работах [11 – 15], было получено монофункциональное уравнение связи предельной деформации металла (ПДМ) до разрушения со всеми факторами ПСМ в следующем виде:

$$\varepsilon_{\text{пред}} = \ln \left(\frac{\rho_{m0}}{\rho_{mk}} \right)^{1/m}, \qquad (6)$$

где ρ_{m0} , ρ_{mk} – исходная и конечная (критическая в момент разрушения) плотность металла, их соотношение соответствует величине Δ в уравнении (2); *m* – показатель степени, равный

$$m = \left(\frac{\text{HB}}{\sigma_T} - 2\right) \exp(\alpha \Pi) \varepsilon_{\text{px}} - \frac{V_{\text{pen}}}{V_{\text{ne}\phi}}, \quad (7)$$

где HB – твердость сталей, которая зависит от структурно-энергетического состояния (химического и фазового состава, величины зерна, вида и режима термообработки и пр.) и изменяется от 900 до 6000 МПа; σ_T – предел текучести железа, принятый равным 300 МПа; П – показатель напряженного состояния, равный

$$\Pi = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_T}; \tag{8}$$

$$\varepsilon_{\rm px} = \frac{\rho_{m0}}{\rho_{mk}};\tag{9}$$

 $V_{\rm pen}$ – относительная скорость релаксации внутренних напряжений, определяется экспериментально [16]; $V_{\rm дe\phi}$ – скорость нагружения, наблюдаемая при эксплуатации.

Повреждения металла могут происходить на всех уровнях строения материи (электронном, нано-, субмикро-, микро-, мезо-, макроуровнях), поэтому их закономерности имеют синергетическую природу (усиливаются от взаимодействия) [17 – 19].

σ,

 σ_{7}

На рис. 2 представлены следующие фазы в структуре поликристалла:

I – кристаллическая фаза, которая контролирует сопротивление началу пластической деформации через σ_T и разрушения через S_T (которые равны);

2 – полосы скольжения с дислокациями, микротрещинами – квазиаморфная фаза, сопротивление деформации и разрушения в которой контролируется предельной энергоемкостью W_c ;

3 – вязкие зоны перед трещинами с энергоемкостью $W_{\rm c}^{\rm крит}$, составляющей часть общей энергоемкости тела $W_{\rm c}^{\rm крит} = (0.25 \div 0.75) W_{\rm c}$;

4 — микротрещины или дефектная фаза, в которой сопротивление распространению трещины контролируется вязкостью разрушения K_c , которая пропорциональна $W_c^{\text{крит}}$ перед трещиной.

Цель работы заключалась в оценке структурной чувствительности предельной деформации трубной стали X70, имеющей разные сроки эксплуатации и различное поврежденное состояние, по механическим свойствам и новым комплексным энергетическим критериям разрушения. Критерии разработаны в концепции современного естествознания – синергетике, изучающей термодинамику неравновесного состояния структур и иерархию подчиненности разрушения сложных систем [20 – 22], к которым относятся структуры всех конструкционных сталей.

В металлах процессы пластической деформации и разрушения протекают при приложении нагрузки одновременно с взаимным влиянием друг на друга. Носителем и показателем связи указанных процессов в конструкционных сталях являются дислокации, обеспечивающие устойчивость структуры под напряжением [23, 24].

Деформация и разрушение связаны показателем разрыхления (повреждаемости). Механические показатели служат для оценки первичной стадии пластической деформациии упрочнения, а новые критерии разрушения (параметры поврежденности) – для оценки степени деградации (разрыхления) и работоспособности. В качестве последних предложены следующие выражения комплексных двух и трех параметрических энергетических критериев разрушения.

• Энергоемкость W_c [9, 10, 27] (МДж/м³) – показатель структурно-энергетического состояния материалов, который определяется по формуле

$$W_{\rm c} = 0,5(\sigma_T + \sigma_{\kappa})\varepsilon^{\rm npeg} = 0,5(S_T + S_{\kappa})\varepsilon^{\rm npeg}, \quad (10)$$

где σ_T – сопротивление началу пластической деформации (предел текучести), равное S_T – сопротивлению начала разрушения; σ_{κ} – истинный предел прочности, равный сопротивлению разрушения S_k в конечной точке диаграммы растяжения; $\varepsilon^{\text{пред}}$ (или ψ или δ) – истинная предельная деформация (до разрушения) при растяжении, равная



Рис. 2. Фазы в деформированном зерне поликристалла (описание в тексте)

Fig. 2. Phases in deformed grain of polycrystal (description in text)

$$\varepsilon^{\text{пред}} = \ln\left(\frac{1}{1-\psi}\right),\tag{11}$$

где ψ – относительное сужение (для пластичных материалов),

$$\varepsilon^{\text{пред}} = \ln(1 + \delta), \qquad (12)$$

где $\delta-$ относительное удлинение (для хрупких материалов).

В формулу (10) для расчета энергоемкости входят значения предела текучести, сопротивления разрушению, предельной деформации и упрочняемость, влияющие на закономерности работоспособности материалов.

• Критерий зарождения трещин $K_{_{3T}}$ [11, 12] (величина безразмерная) – характеристика, количественно определяющая способность материала сопротивляться возникновению трещин при деформации:

$$K_{\rm sr} = \frac{W_{\rm c}}{S_T},\tag{13}$$

причем чем выше значения $K_{_{3T}}$, тем труднее зарождаются трещины и тем надежнее материал.

• Критерий распространения трещин *K*_{рт} [11, 12] (МДж/м³) или (МПа) – характеристика, количественно определяющая способность материала сопротивляться свободному движению трещин при деформации в условиях достижений критического напряженного состояния:

$$K_{\rm pr} = W_{\rm ckp} \sigma_T, \tag{14}$$

где $W_{\rm ckp}$ – критическая величина предельной удельной энергии деформации перед вершиной трещины,

которая определяется при критическом напряженном состоянии (трехосном напряжении), когда энергия деформации, затраченная на пластическую деформацию, равна энергии, идущей на упругое искажение объема перед трещиной.

Согласно анализу многочисленных экспериментальных данных, $W_{ckp} = (0,75 \div 0,50) W_c$ [12] для пластичных сталей в зависимости от уровня предельной деформации. Показатель выбирается в месте перегиба диаграмм предельной пластичности при критическом напряженном состоянии, равном 2,41 при коэффициенте Пуассона сплавов железа 0,28.

Чем выше значения K_{pr} , тем труднее в материале распространяются трещины.

• Критерий хрупкости K_{xp} [11, 12] (МДж/м³)² или (МПа)² – характеристика, количественно раскрывающая понятие «хрупкость» по соотношению критериев зарождения и распространения трещин:

$$K_{\rm xp} = \frac{K_{\rm pr}^2}{K_{\rm sr}S_T} = \frac{K_{\rm pr}^2}{K_{\rm sr}\sigma_T},$$
 (15)

причем чем выше $K_{\rm xp}$, тем сильнее критерий распространения трещины превышает критерий зарождения трещин, и тем лучше металл противостоит хрупкости.

• Критерий масштаба $K_{\rm M}$ (безразмерная величина) учитывает влияние размера трубы по отношению к размеру образца и оценивает чувствительность материала к масштабу изделия по соотношению упругих констант $(e_{xx}$ – упругие константы) материала к комплексу хрупкости K_{xn} :

$$K_{\rm M} = \frac{e_{\rm xx}}{K_{\rm xp}},\tag{16}$$

где $e_{xx} = \frac{EW_{c \kappa p}^2}{(1 + v)(1 - 2v)}$, *Е* и *v* – модуль Юнга и коэффи-

циент Пуассона материала соответственно.

Чем выше критерий $K_{\rm M}$, тем лучше материал противостоит увеличению масштаба реального изделия (для магистральных трубопроводов используют трубы диаметром от 219 до 1420 мм).

В зависимости от степени повреждаемости структуры сталей коррозией, вибрацией (при усталости), концентраторов напряжения вокруг поверхностных и внутренних дефектов, величина $W_{\rm скр}$ снижается, следовательно, снижается $K_{\rm xp}$ и срок эксплуатации магистральных трубопроводов.

Рассмотрим использование критериев разрушения для образцов из стали X70. Образцы были вырезаны из труб размером 1420×16,5 мм [26, 27] после различных сроков эксплуатации.

Механические свойства металла труб марки X70 в исходном состоянии определим по нормативному документу ОАО «АК «Транснефть» [25]: $\sigma_{_{\rm B}} = 610$ МПа; $\sigma_{_{0,2}} = 460$ МПа; $\psi = 0,60$, при которых значения критериев разрушения составили: $W_c = 737,6 \text{ (МДж/м}^3);$ $K_{3T} = 1,604; K_{DT} = 16,97 \text{ (МДж/м}^3)^2; K_{XD} = 3,903 \text{ (МДж/м}^3]^2.$

С целью идентификации марки металла труб по регламентированным характеристикам проводили испытание образцов на растяжение на установке МР-100. Было изготовлено 12 поперечных образцов трубы с параметрами 1420×16,5 мм. Механические характеристики приведены в табл. 1. В табл. 2 показаны численные значения критериев разрушения.

Поперечные образцы, обозначенные как 21÷32 (исходные номера такие же) были отобраны из аварийных труб: 21÷24, Пунга – Ухта – Грязовец, авария 17.08.2000 г., 535 км, 20 лет эксплуатации; 25÷28, Ухта – Торжок-3, авария 23.02.2000 г., 1116 км, 24 года эксплуатации и действующих труб; 29÷32, СРТО – Торжок, 5 лет эксплуатации, 116,7 км.

Анализ табл. 1, 2 показал изменение механических свойств и критериев разрушения.

После 5 лет эксплуатации:

$\sigma_{\rm B} = 625 - 610 = 15 \mathrm{M}\Pi\mathrm{a}$	Разброс ≈ 2,4 %
HB = 1838 - 1794 = 44	Разброс \approx 2,4 %
W _c = 806 − 1193,6 = −387,6 МДж/м ³	Разброс \approx 32,0 %
$K_{\rm st} = 2,105 - 1,663 = 0,442$	Разброс \approx 21,0 %
$K_{\rm pr} = 33,84 - 19,92 = 13,92 \; (M \square \#/m^3)^2$	Разброс \approx 41,0 %
$K_{xp} = 9,55 - 4,92 = 4,63 \ (MДж/м^3)^3$	Разброс \approx 48,5 %

Видно, что после пяти лет эксплуатации механические характеристики практически не изменились и лежат в пределах разброса экспериментальных данных. Изменения критериев разрушения направлены в сторону их снижения и составляют от 21 до 48,5 %, причем наибольшее изменение наблюдается у критерия распространения трещины и, соответственно, у критерия хрупкости.

После 20 лет эксплуатации:

$\sigma_{_{\rm B}} = 584 - 557 = 27 \ {\rm M}\Pi{\rm a}$	Разброс \approx 4,6 %
HB = 1718 - 1638 = 80	Разброс \approx 4,6 %
<i>W</i> _c = 907,8 − 488,5 = 419,3 МДж/м ³	Разброс $\approx 46 \%$
$K_{_{3\mathrm{T}}} = 1,876 - 1,186 = 0,687$	Разброс $\approx 36 \%$
$K_{\rm pr} = 21,97 - 10,06 = 13,92 (MДж/м^3)^2$	Разброс $\approx 54 \%$
$K_{xp} = 5,317 - 2,073 = 4,63 $ (МДж/м ³) ³	Разброс $\approx 61 \%$

После 24 лет эксплуатации:

$\sigma_{_{\rm B}} = 632 - 620 = 12 \text{ M}\Pi a$	Разброс \approx 1,9 %
HB = 1859 - 1824 = 35	Разброс \approx 1,9 %
W _c = 744,6 – 275 = 469,6 МДж/м ³	Разброс \approx 63,0 %
$K_{_{3T}} = 1,519 - 0,585 = 0,934$	Разброс \approx 61,0 %
$K_{\rm pt} = 21,97 - 10,06 = 11,91 \; (MДж/м^3)^2$	Разброс \approx 54,0 %
$K_{\rm xp} = 4,469 - 1,74 = 2,729 (MДж/м^3)^3$	Разброс ≈ 61,0 %

Видно, что после 24 лет эксплуатации разброс значений показателей прочности практически также не

Результаты испытания на растяжение образцов 21 ÷ 32 основного металла труб (в числителе вычисленное значение, в знаменателе округленное согласно ГОСТ 1497 – 84)*

Место отбора образца	Обозначение образца	σ _в , МПа	σ _{0,2} , МПа	$\sigma_{_{0,2}}/\sigma_{_{\mathrm{B}}}$	δ, %	ψ, %	<i>E</i> , ГПа при корреляции <i>r</i>	σ _в δ, МДж/м³
СРТО – Торжок, 116,7 км, 5 лет	29	<u>625</u> 630	<u>567</u> 570	0,91	<u>22,1</u> 22,0	<u>65,8</u> 69,0	2,14 0,98	138,1
	30	<u>628</u> 630	<u>550</u> 550	0,88	<u>19,3</u> 19,0	<u>60,4</u> 60,0	2,20 0,99	121,2
	31	<u>637</u> 640	<u>507</u> 510	0,80	<u>21,0</u> 21,0	<u>60,4</u> 60,0	2,27 0,98	133,8
	32	<u>610</u> 610	<u>494</u> 500	0,81	<u>24,0</u> 24,0	<u>60,4</u> 60,0	2,08 0,99	146,4
Пунга – Ухта – Грязовец, авария 17.08.2000 г., 535 км 20 лет	21	<u>584</u> 580	<u>412</u> 410	0,71	<u>24,0</u> 24,0	<u>53,1</u> 53,0	1,82 0,99	140,0
	22	<u>582</u> 580	<u>486</u> 490	0,84	<u>25,2</u> 25,0	<u>56,4</u> 56,0	2,17 0,99	146,7
	23	<u>572</u> 570	<u>398</u> 400	0,70	<u>23,6</u> 24,0	<u>57,4</u> 58,0	1,99 0,98	135,0
	24	<u>557</u> 650	$\frac{484}{480}$	0,87	<u>27,7</u> 28,0	<u>63,4</u> 63,0	2,26 0,97	154,3
Ухта – Торжок-3, авария 23.02.2000 г., 1116 км, 24 года	25	<u>625</u> 630	<u>512</u> 510	0,82	<u>13,7</u> 14,0	<u>36,5</u> 37,0	1,95 0,99	85,6
	26	<u>620</u> 620	<u>503</u> 500	0,81	<u>15,7</u> 16,0	<u>35,0</u> 36,0	2,13 0,99	97,3
	27	<u>623</u> 620	<u>490</u> 490	0,79	<u>20,7</u> 21,0	<u>58,8</u> 59,0	2,15 0,98	129,0
	28	<u>632</u> 630	<u>492</u> 490	0,78	<u>7,0</u> 7,0	<u>36,9</u> 37,0	2,19 0,98	44,2

Table 1. Tensile test results of $32 \div 21$ samples of pipes basic metal (calculated value is in the numerator and denominator is rounded off in accordance with GOST 1497-84)

* Исходные данные «Испытание поперечных образцов труб на статическое растяжение» представлены Ухтинским государственным техническим университетом, исполнители: д.т.н., профессор Андронов И.Н., к.ф-м.н, доцент Богданов Н.П.

изменился, тогда как разброс значений критериев разрушения увеличился до 54 – 63 %. С увеличением срока эксплуатации трубопровода разброс данных увеличивается.

Общий анализ данных, табл. 1, 2 показал следуюшее.

• Значения предела прочности и твердости:

 слабо чувствительны к сроку службы изделия в пределах от 4 до 24 лет;

- после 20 лет эксплуатации о, и НВ имеют значения на 15 % ниже, чем после 5 лет эксплуатации;

 – после 24 лет эксплуатации о_в и НВ имеют значения на 20 % ниже, чем после 5 лет эксплуатации;

- не являются критериями оценки работоспособности и долговечности трубных сталей и служат только для выбора уровня механических свойств поставляемых материалов из-за малой чувствительности прочностных характеристик к процессам, протекающим в металле труб.

• Значения энергетических коэффициентов $K_{_{3T}}, K_{_{DT}}$, *K*_{хр} оказались очень чувствительными к сроку эксплуатации трубопроводов.

• Общее снижение синергетических характеристик разрушения составило, по сравнению с пятилетним сроком эксплуатации, по показателю энергоемкости:

- снижение
$$W_{\rm c} = \frac{W_{\rm c}(\text{после 5 лет})}{W_{\rm c}(\text{после 20 лет})} = 1,4$$
 раза;

- снижение
$$W_{\rm c} = \frac{W_{\rm c} (\text{после 20 лет})}{W_{\rm c} (\text{после 24 лет})} = 1,6$$
 раза;

- снижение
$$W_{\rm c} = \frac{W_{\rm c} (\text{после 5 лет})}{W_{\rm c} (\text{после 24 лет})} = 2,3$$
 раза

Таблица 2

Критерии разрушения трубных сталей после различных сроков эксплуатации

Место отбора образца	Обозначение образца	σ _в , МПа	HB	<i>W</i> _c , МДж/м ³	<i>К</i> _{3т}	<i>К</i> _{рт} , (МДж/м ³) ² ·10 ⁶	<i>К</i> _{хр} , (МДж/м ³) ³ ·10 ⁹
СРТО – Торжок, 116,7 км, 5 лет	29	625	1838	1193,6	2,105	33,84	9,593
	30	628	1847	898	1,633	24,7	6,791
	31	637	1874	827,8	1,633	20,99	5,32
	32	610	1794	806,6	1,633	19,92	4,921
Пунга – Ухта – Грязовец, авария 17.08.2000 г., 535 км 20 лет	21	584	1718	488,5	1,186	10,06	2,073
	22	582	1712	664,4	1,367	16,14	3,923
	23	572	1682	568,4	1,428	11,31	2,251
	24	557	1638	907,8	1,876	21,97	5,317
Ухта – Торжок-3, авария 23.02.2000 г., 1116 км, 24 года	25	625	1838	299,3	0,585	7,66	1,962
	26	620	1824	275	0,547	6,92	1,74
	27	623	1832	744,6	1,519	18,24	4,469
	28	632	1859	292,8	0,595	7,2	1,772

Table 2. Criteria of pipe steel fracture after different operation periods

– снижение
$$W_{\rm c} = \frac{W_{\rm c}}{W_{\rm c}} ($$
после 24 лет $) = 1,8$ раза.

Интенсивное снижение энергоемкости труб происходит в течении всего срока эксплуатации. Для сравнения в последней строке приводятся данные, где рассматриваются образцы, вырезанные из труб, находящихся на складе.

На рис. 3 представлена новая диаграмма структурно-энергетического состояния стали X70 в координатах «энергоемкость – твердость» после различных сроков эксплуатации.

Из данных рис. 3 и табл. 1, 2 видно, что твердость стали секций трубопроводов «Ухта – Торжок-3» (24 года) и «СРТО – Торжок» (5,5 лет) с течением времени не изменилась и равна приблизительно 1830 НВ, тогда как синергетические критерии оказались очень чувствительны к сроку службы трубопровода из-за снижения энергоемкости по причине уменьшения их предельной пластичности.

На рис. 4 приведен единый график снижения критерия зарождения трещин K_{3T} трубных стали после 5, 20, 24 лет эксплуатации в зависимости от уровня относительного сужения, который носит монотонный характер.

Для сравнения на рис. 5 приведен аналогичный график снижения критерия зарождения трещин $K_{\rm 3T}$ для сталей различных марок перлитного, перлитно-мартенситного, мартенситного и мартенситно-ферритного классов [8] в зависимости от относительного сужения, который носит такой же монотонный характер: при одинаковой величине относительного сужения значение критерия зарождения трещин всех представленных сталей является одинаковым. Это указывает на то, что природа зарождения трещин одинакова для всех классов сталей и лежит на мезоуровне, на котором неоднородность деформации находится на максимальном уровне по числу концентратов напряжений.





Рис. 4. Зависимость критерия зарождения трещин K_{зт} от относительного сужения трубных сталей после 5, 20, 24 лет эксплуатации: ■ – Пунга – Ухта – Грязовец, 1420×16,5, Харцизский трубный завод, Х70, авария 17.08.2000 г., 535 км, 20 лет; ▲ – Ухта – Торжок-3, 1420×16,5, Италия, Х70, авария 23.02.2000 г., 1116 км, 24 года; ◆ – СРТО – Торжок, 1420×16,5, Харцизский трубный завод, Х70, безаварийный участок, 5,5 лет; ● – характеристики стали Х70 согласно РД-23.040.00-КТН-115-11



График на рис. 5 должен служить основанием для выбора требуемой марки стали труб, обеспечивающей более длительный срок службы.

Выводы. Под действием эксплуатационных нагрузок энергоемкость, т.е. способность металла противостоять любым нагрузкам (а, следовательно, разрушению) с увеличением срока эксплуатации значительно снижается.

Зная предельные значения синергетических критериев разрушения $W_c, K_{\rm sr}, K_{\rm pr}, K_{\rm xp}, K_{\rm M}$, можно прогнозировать работоспособность сталей трубопроводов путем сравнения их с расчетными показателями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Эфрон Л.И. Материаловедение в большой металлургии. Трубные стали. М.: Металлургиздат, 2012. 696 с.
- Методология выбора металлических сплавов и упрочняющих технологий в машиностроении: Учеб. пособие. – В 2-х томах. Т. 1. Стали и чугуны / М.А. Филиппов, В.Г. Бараз, М.А. Гервасьев, М.М. Розенбаум. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2013. – 232 с.



Рис. 5. Зависимость критерия зарождения трещин $K_{\rm 3rr}$ от относительного сужения трубных сталей после 5, 20, 24 лет эксплуатации и сталей различных марок перлитного, перлитно-мартенситного,

мартенситного и мартенситно-ферритного классов: – Пунга – Ухта – Грязовец, 1420×16,5, Харцизский трубный завод, Х70, авария 17.08.2000 г., 535 км, 20 лет;

– характеристики стали X70 согласно РД-23.040.00-КТН-115-11;
 × – значения параметров состояния для различных марок стали

Fig. 5. Crack nucleation criterion $K_{_{3T}}$ dependence on contraction after 5, 20, 24 years of operation of pipe steels and steels or different brands:

- pearlite, pearlite-martensite, martensite, martensite-ferritic: – Punga – Ukhta – Gryazovets, 1420×16.5, Khartsyzsk Pipe Plant,
- X70, accident 08/17/2000, 535 km, 20 years; ▲ – Ukhta – Torzhok-3, 1420×16.5, Italy, X70, accident of
- 02/23/2000,1116 km, 24 years; → SRTO Torzhok, 1420×16.5, Khartsizsk Pipe Plant, X70, trouble-free section, 5.5 years; → - characteristics of steel X70 according to

RD-23.040.00-KTN-115-11 X – state parameters for various steel grades

- Куманин В.И., Соколова М.Л., Лунева С.В. Развитие повреждаемости в металлических материалах // Металловедение и термическая обработка металлов. 1995. № 4. С. 2 – 6.
- Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. – М.: Машиностроение, 1981. – 272 с.
- Архаров В.И. Мезоскопические явления в твердых телах // Проблемы современной физики: Сб. статей к 100- летию со дня рождения А.Ф. Иоффе. – Л.: Наука, 1980. С. 384 – 409.
- Степанов В.А. Роль деформации в процессе разрушения твердых тел // Проблемы прочности и пластичности металлов: Сб. науч. тр. ЛТФИ. – Л.: Наука, 1979. С.10 – 26.
- Владимиров В.И. Физическая природа разрушения металлов. – М.: Металлургия, 1984. – 280 с.
- 8. Журков С.Н. Кинетическая теория прочности // Журнал технической физики. 1958. Т. 28. С. 17 19.

- Синергетика и фракталы в материаловедении / В.С. Иванова, А.С. Баланкин, И.Ж. Бунин, А.А. Оксогоев. М.: Наука и жизнь, 1994. 383 с.
- Иванова В.С. Концепция Л. Жильмо предельной удельной энергии деформации с позиции синергетики // Известия АН ССР. Металлы. 1989. № 5. С. 179 – 179.
- Скуднов В.А. Предельные пластические деформации металлов. – М.: Металлургия, 1989. – 187 с.
- Скуднов В.А. Синергетика явлений и процессов в металловедении, упрочняющих технологиях и разрушении: Учеб. пособие. – Н. Новгород: НГТУ им Р.Е. Алексеева, 2011. – 198 с.
- Скуднов В.А. Определение величины работоспособности материалов (сталей) деталей машин: Метод. указания для выполнения лабор. и науч.-исслед. работ студентами, магистрантами и аспирантами спец. 110500. – Н.Новгород: НГТУ, 2002. – 14 с.
- Скуднов В.А., Богашев Ф.А. Закономерности изменения плотности металлов при ОМД // Изв. вуз. Черная металлургия. 1986. № 8. С. 38 – 45.
- Скуднов В.А. Закономерности поведения энергоемкости металлов и новые энергетические критерии разрушения // Изв. вуз. Черная металлургия. 2013. № 1. С. 52 – 55.
- 16. Борздыка А.М., Гецов Л.Б. Релаксация напряжений в металлах и сплавах. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Металургия, 1978. – 256 с.
- Маслов Л.И., Замолодчиков О.Г. Кунавин С.А. Использование параметров микрорельефа разрушения для оценки работоспособности конструктивных материалов / Известия АН ССР. Металлы. 1982. № 1. С. 196 – 201.
- Тот Л., Ромвари П. Применение концепции удельной работы разрушения для оценки циклической трещиностойкости сталей // Проблемы прочности. 1986. № 1. С. 38 – 45.

- Бетехин В.И. Пластическая деформация и разрушение кристаллических тел. Сообщение 1, 2 // Проблемы прочности. 1979. № 7. С. 38 45; 1979. № 8. С. 51 57.
- 20. Проблемы старения сталей магистральных трубопроводов / Под ред. Б.В. Будзуляка, А.Д. Седых, В.Н. Чувильдеева. Н.Нов-город: Университетская книга, 2006. 220 с.
- Новиков И.И. Термодинамические аспекты пластической деформации и разрушения металлов // Физико-механические и теплофизические свойства металлов: Сб. науч. тр. ИМЕТ. – М.: Наука, 1976. С. 170 – 179.
- Artinger I. Conection between the fracture determining the Toughness of hot working tool steels // Proc. Conf. on dimensioning and dapest. Akadem. Kiado. 1974. Vol. 1. P. 215.
- 23. Ginstler Y. Retarding the crack initiation process during low cycle thermal shock fatigue // Proc. Conf. low cycle fatigue and elastoplastic behavior of materials (Minich. Sept. 7 – 11, 1987) / Ed. K.T.L. Rie. – N.Y.: Elsevier Appl. Sci., 1987. P. 643.
- 24. Пояркова Е.В. Эволюция структурно- механической неоднородности материалов сварных элементов конструкций в рамках концепции иерархического согласования масштабов: Автореф. дис. ... док. техн. наук. – Уфа: Уфим. гос. нефтяной техн. ун-т, 2015.
- 25. РД-23.040.00-КТН-115-11 Нефтепроводы и нефтепродуктопроводы магистральные. Определение прочности и долговечности труб и сварных соединений с дефектами. – М.: ОАО «АК«Транснефть», 2013. – 142 с.

Поступила в редакцию 2 марта 2015 г. После доработки 9 октября 2018 г. Принята к публикации 25 декабря 2018 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2019. VOL. 62. No. 1, pp. 25-33.

ESTIMATION OF STRUCTURAL SENSITIVITY OF PIPE STEELS ULTIMATE STRAIN TO PIPELINES SERVICE LIFE USING COMPLEX ENERGY CRITERIA OF SYNERGY FRACTURE

V.A. Skudnov¹, A.S. Safronov², A.A. Khlybov¹

¹Novgorod State Technical University named after R. Alexeev, Nizhny Novgorod, Russia

² JSC Transneft UW Service, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article gives an overview of well-known hypotheses and theories on ultimate state of metals. Processes in metals when stress is applied are described. Multifunctional equation for ultimate strain dependence from density (opening) is offered with all the factors of metal's ultimate state before fracture. Phases of the fracture of deformed polycrystal structure are specified. An equation is presented that relates the ultimate deformation of a metal to fracture with all the characteristics that determine the limiting state of the metal. Two- or three- compound energy failure criteria equations used for quality estimation of metal structure and performance when main pipeline operating are given for such criteria as energy capacity, crack initiation, crack proliferation, fragility and scale. The fracture criteria calculation for Kh70 steel samples of pipes after operation for 5, 20 and 24 years was made as an example. The comparative analysis of complex fracture criteria values for Kh70 steel pipelines of different lifespans has been carried out. After 5, 20 and 24 years of usage mechanical characteristics of steel Kh70 of main pipelines haven't changed dramatically, and fracture criteria are inclined to decrease from 21 to 48.5 %, crack proliferation and fragility criteria are the most changeable. At mesolevel the nature of crack initiation is the same for all classes of steel. Under the influence of operating loads, energy intensity, i.e. the ability of metal to withstand any loads with increasing service life is significantly reduced, which is confirmed by the change in the fracture criteria considered in the article. It is shown that the fracture criteria

can be used to predict the performance of pipeline steels after a long period of operation.

Keywords: ultimate state of metals, ultimate strain, internal stress relaxation, energy capacity, energy fracture criteria, crack initiation, crack proliferation, fragility, scale.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-1-25-33

REFERENCES

- Efron L.I. Materiallovedenie v bol'shoi metallurgii. Trubnye stali [Materials science in metallurgy. Pipe steel]. Moscow: Metalurgizdat, 2012, 696 p. (In Russ.).
- Filippov M.A., Baraz V.R., Gervas'ev M.A., Rozenbaum M.M. Metodologiya vybora metallicheskikh splavov i uprochnyayushchikh tekhnologii v mashinostroenii: uchebnoe posobie: v 2 t. T. 1. Stali i chuguny [Methodology for selection of metal alloys and hardening technology in mechanical engineering: Textbook in 2 vols. Vol. 1: Steel and iron]. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. Un-ta, 2013, 232 p. (In Russ.).
- Kumanin V.I., Sokolova M.L., Luneva S.V. Development of damage in metallic materials. *Metal Science and Heat Treatment*. 1995, vol. 37, no. 4, pp. 131–135.
- 4. Makhutov N.A. *Deformatsionnye kriterii razrusheniya i raschet elementov konstruktsii na prochnost'* [Deformation and fracture criteria and calculation of strength of construction elements]. Moscow: Mashinostroenie, 1981, 272 p. (In Russ.).
- Arkharov V.I. Mesoscopic phenomena in solids. In: Problemy sovremennoi fiziki: Sb.statei k 100-letiyu so dnya rozhdeniya A.F. Ioffe

[Issues of modern physics: Coll. of articles to the 100th anniversary of A.F. Ioffe]. Leningrad: Nauka, 1980, pp. 384–409. (In Russ.).

- Stepanov V.A. Role of the deformation in the destruction process of solids. In: *Problemy prochnosti i plastichnosti metallov: sb. nauchn. tr. LTFI* [Problems of strength and plasticity of metals: Coll. of sci. papers of LTFI]. Leningrad: Nauka, 1979, pp. 10–26. (In Russ.).
- 7. Vladimirov V.I. *Fizicheskaya priroda razrusheniya metallov* [Physical nature of metals fracture]. Moscow: Metallurgiya, 1984, 280 p. (In Russ.).
- 8. Zhurkov S.N. Kinetic theory of strength. *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki*. 1958, vol. 28, pp. 17–19. (In Russ.).
- Ivanova V.S., Balankin A.S., Bunin I.Zh., Oksogoev A.A. Sinergetika i fraktaly v materialovedenii [Synergetics and fractals in materials science]. Moscow: Nauka i zhizn', 1994, 383 p. (In Russ.).
- Ivanova V.S. Synergetic-based consideration of Gilemot's concept of the ultimate specific deformation energy. *Russian metallurgy* (*Metally*). 1989, no. 5, pp. 160–169.
- 11. Skudnov V.A. *Predel'nye plasticheskie deformatsii metallov* [Limit plastic deformations of metals]. Moscow: Metallurgiya, 1989, 187 p. (In Russ.).
- 12. Skudnov V.A. Sinergetika yavlenii i protsessov v metallovedenii, uprochnyayushchikh tekhnologiyakh i razrushenii. Uchebnoe posobie [Synergetics of phenomena and processes in metallurgy, hardening technologies and fracture. Tutorial]. Nizhny Novgorod: NGTU im R.E. Alekseeva, 2011, 198 p. (In Russ.).
- 13. Skudnov V.A. Opredelenie velichiny rabotosposobnosti materialov (stalei) detalei mashin: Metod. ukazaniya dlya vypolneniya lab. i nauchn.-issled. rabot studentami, magistrantami i aspirantami spets. 110500 [Determination of the efficiency of materials (steel) of machinery parts: Method. instructions for laboratory and research works for students, undergraduates and postgraduates of 110500 specialization]. Nizhny Novgorod: NGTU, 2002, 14 p. (In Russ.).
- Skudnov V.A., Bogashev F.A. Laws of metal density changes at metal forming. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1986, no. 8, pp. 38–45. (In Russ.).
- **15.** Skudnov V.A. Behavioral patterns of metals energy intensity and new energy-sensitive destruction criterion. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy.* 2013, no. 1, pp. 52–55. (In Russ.).
- Borzdyka A.M., Getsov L.B. *Relaksatsiya napryazhenii v metallakh i splavakh* [Stress relaxation in metals and alloys]. Moscow: Metalurgiya, 1978, 256 p. (In Russ.).
- Maslov L.I., Zamolodchikov O.G., Kunavin S.A. Using the parameters of microrelief failure to assess the performance of construction materials. *Izvestiya AN SSR. Metally.* 1982, no. 1, pp. 196–201. (In Russ.).

- Tot L., Romvari P. Application of the concept of specific fracture performance for the evaluation of cyclic crack resistance of steels. *Problemy prochnosti*. 1986, no. 1, pp. 38–45. (In Russ.).
- Betekhin V.I. Plastic deformation and fracture of crystalline bodies. Message 1-2. *Problemy prochnosti.* 1979, no. 7, pp. 38–45; 1979, no. 8, pp. 51–57. (In Russ.).
- **20.** Problemy stareniya stalei magistral'nykh truboprovodov [Ageing of steel of main pipelines]. Budzulyak B.V., Sedykh A.D., Chuvil'deev V.N. eds. Nizhny Novgorod: Universitetskaya kniga, 2006, 220 p. (In Russ.).
- **21.** Novikov I.I. Thermodynamic aspects of plastic deformation and fracture of metals. In: *Fiziko-mekhanicheskie i teplofizicheskie svoistva metallov: sb. nauchn. tr. (IMET)* [Physical-mechanical and thermal properties of metals. Coll. of sci. papers (IMET)]. Moscow: Nauka, 1976, pp. 170–179. (In Russ.).
- 22. Artinger I. Connection between the fracture determining the toughness of hot working tool steels. *Proc. Conf. on dimensioning and dapest. Akadem. Kiado*, 1974, vol. 1, p. 215.
- 23. Ginstler Y. Retarding the crack initiation process during low cycle thermal shock fatigue. *Proc. Conf. low cycle fatigue and elasto-plastic behavior of materials. (Minich. Sept. 7-11, 1987).* Rie K.T.L. ed. N.Y.: Elsevier Appl. Sci., 1987, p. 643.
- 24. Poyarkova E.V. Evolyutsiya strukturno-mekhanicheskoi neodnorodnosti materialov svarnykh elementov konstruktsii v ramkakh kontseptsii ierarkhicheskogo soglasovaniya masshtabov: avtoref. dis... doktora tekh. nauk. [Evolution of structural and mechanical heterogeneity of welded structural elements of materials within the concept of hierarchical matching scale. Extended Abstract of Dr. Sci. Diss.]. Ufa: Ufimskii Gosudarstvennyi Neftyanoi Tekhnicheskii Universitet, 2015. (In Russ.).
- **25.** RD-23.040.00-KTN-115-11. *Nefteprovody i nefteproduktoprovody magistral'nye. Opredeleniya prochnosti i dolgovechnosti trub i svarnykh soedinenii s defektami* [Pipelines and main pipelines. Determining the strength and durability of the pipe and welds with defects]. Moscow: OAO "AK "Transneft", 2011, 142 p. (In Russ.).

Information about the authors:

V.A. Skudnov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Physical Metallurgy, Heat and Plastic Treatment of Metals"

A.S. Safronov, Acting Chief Mechanic (safronov_ne@mail.ru) **A.A. Khlybov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair "Materials Science, Technology of Materials and Heat Treatment of Metals"

> Received March 2, 2015 Revised October 9, 2018 Accepted December 25, 2018