

669.017:620.1

ВЛИЯНИЕ УСТАЛОСТНОГО НАГРУЖЕНИЯ В МАЛОЦИКЛОВОЙ ОБЛАСТИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ

Д-р. техн. наук, проф. И.М. КОВЕНСКИЙ, канд. техн. наук В.В. НАССОНОВ, асп. О.В. БАЛИНА

Рассмотрены результаты исследований образцов из сталей X60 (по классификации API) магистрального газопровода ($\varnothing 1420 \times 20$) и 09Г2С магистрального нефтепровода ($\varnothing 1020 \times 10$). Определены величины накопленной пластической деформации в зависимости от амплитуды напряжений и количества циклов нагружения при растяжении. Представлены результаты исследований микроструктуры на различных этапах нагружения, изменений макро- и микротвердости, внутренних напряжений, коэрцитивной силы, коррозионной активности, а также данные микрорентгеноспектрального анализа.

Results of tests over samples made of steel X60 (in accordance with API) on a gas main ($\varnothing 1420 \times 20$) and 09Г2С on a trunking oil pipeline ($\varnothing 1020 \times 10$) are examined. Magnitudes of the accumulated plastic strain depending on a range of stress and amounts of stress cycles are determined at the extension. Results of microstructure analyzes at various stages of stressing, variations of macro-and microhardness, internal stresses, coercive force, corrosive activity, and also data of microrentgenoscopy are presented.

Среди промышленных объектов, подвергающихся усталостному нагружению, особое место занимают трубы для магистральных и промысловых трубопроводов. Допустимые напряжения в них часто превышены из-за периодического смещения грунта в условиях болот, сезонно- и многолетне-мерзлых пород. Вследствие этого в элементах трубопроводов развивается пластическая деформация, не допустимая по нормативным документам. Пластическая деформация материала сопровождается изменениями структуры, параметры которой могут служить для диагностики накопленных повреждений в трубах [1—3].

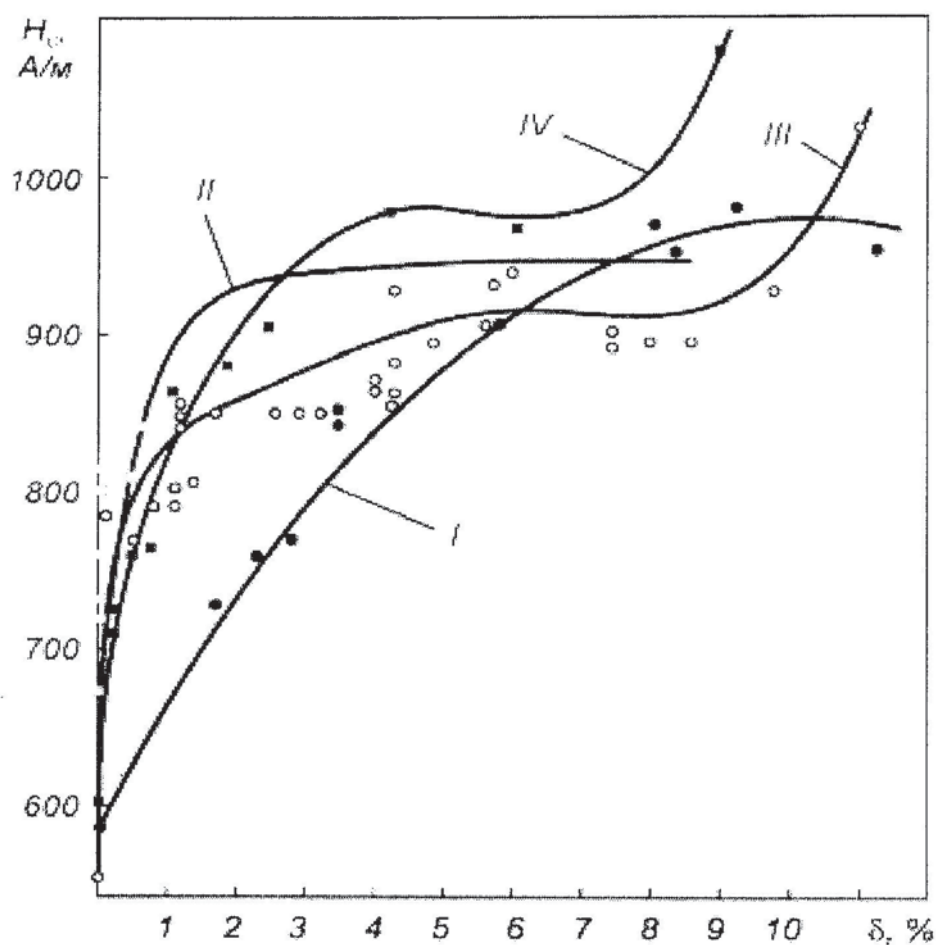


Рис. 1. Зависимость H_c от величины пластической деформации, (образцы I, II, IV – 1 цикл на уровне напряжений, III – до 300 циклов)

Нами изучено поведение низколегированных трубных сталей при усталостном нагружении в малоцикловой области с тем, чтобы глубже понять соотношения между составом, структурой и свойствами сталей, а также повысить точность оценки повреждений металлоконструкций в процессе эксплуатации. Для исследования выбраны стандартные пятикратные образцы диаметром 4-6 мм из трубы магистрального газопровода (сталь X60), изготовленной и находившейся в аварийном запасе с 1970г., и из трубы магистрального нефтепровода (сталь 09Г2С), изготовленной в 1980-м г., которая разрушилась в процессе эксплуатации.

Труба из стали X60 имеет выраженную полосчатость структуры и анизотропию свойств. Труба из стали 09Г2С имеет феррито-перлитную структуру и незначительную анизотропию свойств. Химический состав и механические свойства материалов исследуемых образцов приведены в таблице 1.

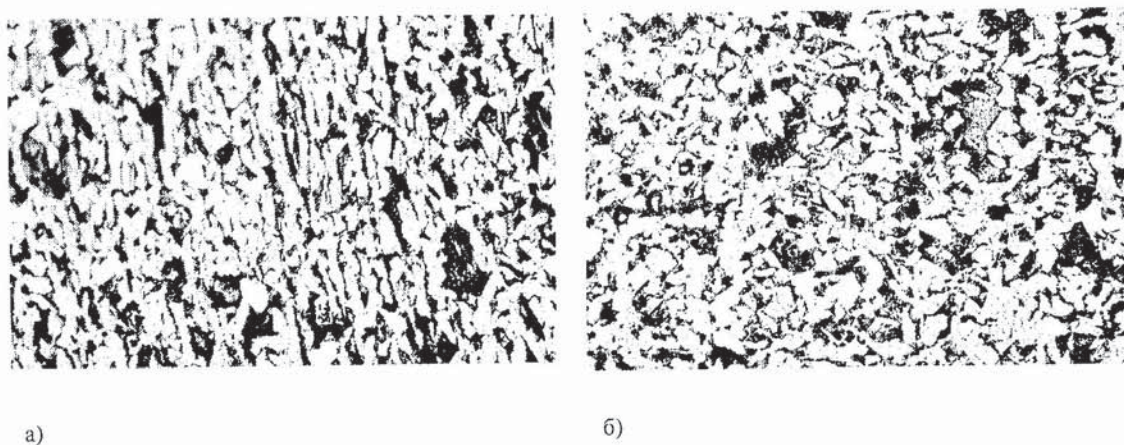
Таблица 1

Химический состав и механические свойства

материалов исследуемых образцов

Х60								
Химический состав (массовая доля элементов), %								
C	Si	Mn	S	P	Nb	Al	Ti	V
0,105	0,269	1,796	0,020	0,025	0,001	0,034	0,087	0,006
Механические свойства								
Предел прочности σ_B , МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , (%)	Относительное сужение Ψ , (%)	Ударная вязкость КСЧ, Дж/см ² (+20°С)				
597	477	14,5	36,0	320				
09Г2С								
Химический состав (массовая доля элементов), %								
C	Si	Mn	S	P	Nb	Cr	Ti	V
	0,32	1,31	0,031	0,022	< 0,004	0,25	0,027	0,0025
Механические свойства								
Предел прочности σ_B , МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , (%)	Относительное сужение Ψ , (%)	Ударная вязкость КСЧ, Дж/см ² (+20°С)				
600	450	28	67	80				

Усталостные испытания при растяжении проведены на установке ЦД-20ПУ при частоте нагружения до 10 циклов в минуту и коэффициенте асимметрии цикла 0,1. Для измерения твердости сталей применялись микротвердомер ПМТ-3, переносной прибор УЗИГ-2М, стационарный твердомер - IN-DENTEC 6030 LKV. Внутренние напряжения определяли по известным методикам на дифрактометре ДРОН-6 [4].

Рис. 2. Микроструктура образца из стали 09Г2С до (а) и после (б) нагружения $\delta=5,8\%$, $\times 200$

Для измерения коэрцитивной силы был использован прибор К-61. Потери массы образцов в коррозионной среде NaCl определяли на аналитических весах AR 2140 (210 гр – max, $\pm 0,0001$ гр), а электрохимический потенциал измеряли с помощью цифрового вольтметра постоянного тока DT830B.

Структурные исследования проводили с помощью светового микроскопа МЕТАМ ЛВ-31 и растрового электронного микроскопа с микроанализатором JED-2300. Статистическую обработку результатов измерений выполняли, используя программы SPSS-3.1 и REGRESS2.

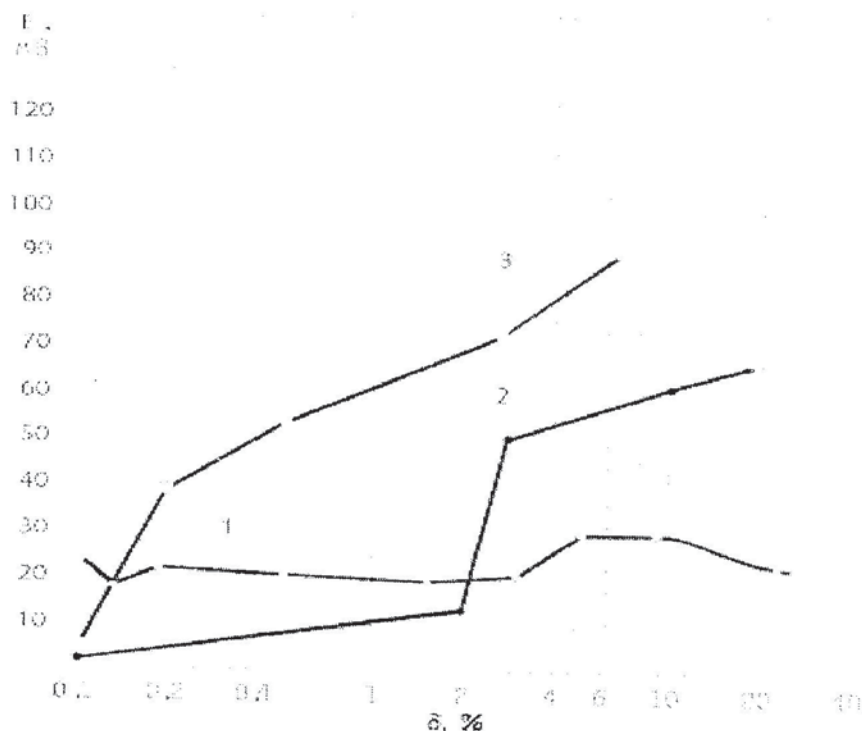


Рис. 3. Зависимость ЭДС между нагруженным и ненагруженным образцами от величины относительного удлинения. Измерения выполнены после 6 мин. пребывания в коррозионной среде

(1 – сталь 20; 2 – сталь 09Г2С; 3 – сталь Х60)

Анализ данных, полученных при усталостных испытаниях, показал, что:

накопленная до разрушения в малоцикловой области пластическая деформация образцов меньше, чем при однократном статическом нагружении и составляет для стали Х60 - 30%, а для стали 09Г2С - 40% относительного удлинения при статическом нагружении.

твердость (HV_1) образцов из стали Х60 после пластической деформации ($\delta=2-4\%$) изменяется с 195 до 210, а из стали 09Г2С ($\delta=5,8\%$) с 208 до 229.

Пластическая деформация сопровождается изменением внутренних напряжений в поверхностном слое. По данным рентгеноструктурного анализа пластическая деформация образца из стали Х60 после наработки 310 циклов при $\sigma_{\max} = 500$ МПа составляет 2,1% и приводит к изменению продольных

напряжений в поверхностном слое от 409 МПа сжатия до 156 МПа растяжения.

Для оценки внутренних напряжений по всему сечению образца проводились измерения коэрцитивной силы (H_c) после статического и циклического нагружений. Установлено, что H_c интенсивно возрастает после пластической деформации, порядка 0,1% и монотонно возрастает при дальнейшем деформировании. Значение H_c ненагруженных образцов всех сталей находятся в пределах 630 – 680 А/м. После однородной пластической деформации образцов в результате статического или циклического нагружений происходит возрастание H_c : до 780 А/м для стали Х 60 и до 950 А/м стали 09Г2С (рис. 1).

Микроструктура исследуемых образцов изменяется после пластической деформации: зерно удлиняется в направлении деформации и на травленных шлифах возрастает контрастность изображения. Последнее, вероятно, связано с увеличением химической активности деформированных зерен. Статистический анализ размеров зерен до и после нагружения образцов позволяет определять величину пластической деформации более 1%. В частности, для стали 09Г2С (рис. 2), когда продольный размер зерен после испытаний возрастает в 1,1 раза, величина пластической деформации $\delta=5,8\%$.

Изучено влияние пластической деформации на электрохимический потенциал (разницу потенциалов между деформированным и недеформированным образцами после помещения их в коррозионный раствор) образцов из исследуемых сталей Х60, 09Г2С и образца-сравнения из стали 20. Установлено, что до пластической деформации электрохимический потенциал трубных сталей Х60 и 09Г2С значительно меньше, чем у стали 20. Однако после пластической деформации 0,2% и более электрохимический потенциал для сталей Х60 и 09Г2С увеличивается от 12 до 60 - 80 мВ, в то время как для стали 20 после пластической деформации он практически не изменяется и равен 25 мВ. Таким образом, можно сделать вывод, что пластическая деформация более 0,1 % приводит к увеличению скорости коррозии всех сталей в несколько раз, а величины электрохимического потенциала в десятки раз. При пластической деформации взятых для сравнения образцов трубы из стали 20 заметного изменения скорости коррозии и электрохимического потенциала не наблюдается. Можно полагать, что увеличение скорости коррозии после пластической деформации объясняется возрастанием химической неоднородности элементов микроструктуры (рис. 3).

С целью выяснения этого предположения был проведен микрорентгеноспектральный анализ [5]. Для устранения систематической погрешности при оценке содержания углерода разработана методика измерений с использованием калибровочных образцов. Результаты микроанализа образцов из трубных сталей до и после усталостного нагружения показали, что значимых изменений содержания легирующих элементов в зернах феррита не обнаружено, а в зернах перлита происходит изменение

содержания углерода (табл. 2).

Таблица 2

Результаты рентгеновского микроанализа зерен перлита

(среднее содержание углерода - x_{cp} , % масс, среднеквадратическое отклонение - s , количество измерений - n).

Материал	До деформации	После деформации
X60	$x_{cp}=4,3$ $s=1,1$ $n=36$	$x_{cp}=5,6$ $s=1,4$ $n=49$
09Г2С	$x_{cp}=4,6$ $s=1,2$ $n=78$	$x_{cp}=6,3$ $s=1,5$ $n=90$

Увеличение содержания углерода в перлите после деформации может быть обусловлено следующими факторами:

1) деформацией феррита между пластинками цементита и увеличением доли цементита в перлите;

2) диффузией углерода в перлите из цементита в поверхностные слои феррита, вызванной локальным повышением температуры микрообластей при пластической деформации.

Обнаруженные изменения структуры, внутренних напряжений, твердости, коэрцитивной силы и коррозионной активности на различных этапах циклического нагружения могут быть использованы для выявления очагов пластической деформации трубопровода и предупреждения возможных аварийных ситуаций путем проведения измерений на действующем трубопроводе при помощи выпускаемых промышленностью приборов, позволяющих выполнять необходимые измерения непосредственно на исследуемом объекте без его повреждения и вырезки образцов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пассонов В.В., Ковенский И.М., Балкина О.В., Пассонова Л.Н. Структура и свойства труб и насосных штанг после механического нагружения // Известия вузов. Нефть и газ. - 2004. - № 5. - С. 156 - 161.
2. Терентьев В.Ф. Усталостная прочность металлов и сплавов. - М.: Интермет Инжиниринг, 2002. - 288 с.
3. Хайнике Г. Трибохимия: Пер. с англ. - М.: Мир, 1987. - 584 с.
4. Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. - М.: МИСИС, 2002. - 360 с.
5. Д. Брандон, У. Каплан Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля. - М.: Техносфера, 2004. - 384 с.