

УДК 539.434

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОМЕНТА ХРУПКОГО РАЗРУШЕНИЯ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ

Крюков Л.Т., Пачурин Г.В.

*ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, e-mail: PachurinGV@mail.ru*

Магистральные газопроводы на Европейском Севере страны эксплуатируются в сложных температурно-силовых условиях, приводящих к накоплению пластической деформации на отдельных участках. Появление и развитие усталостных повреждений трубных сталей является многостадийным и зависит от природы материала, условий нагружения и структурного состояния, обусловленного условиями эксплуатации самих трубопроводов. В работе приведены результаты исследований изменения исходных свойств трубной стали 17ГС, определенных по оригинальной методике с использованием характеристик микропластической деформации. Показано, что через способность структуры к микропластичности можно оценить склонность материала к хрупкости. При этом имеется в виду не абсолютная величина деформации перед разрушением, а существование нескольких механизмов деформации, с помощью которых она может быть реализована. Исходная структура металла обуславливает появление определенных механизмов деформации при конкретных величинах критических напряжений. Отклонение от величин критических напряжений в материале трубы до определенных значений после эксплуатации будет свидетельствовать о пригодности участка трубы для дальнейшей эксплуатации.

**Ключевые слова:** газопроводы, трубная сталь 17ГС, микропластическая деформация, структура, склонность металла к хрупкости, механизмы деформации, критические напряжения

## UTILIZATION OF MICROPLASTIC DEFORMATION TO DETERMINE WHEN TO BRITTLE FRACTURE PIPE STEELS

Kryukov L.T., Pachurin G.V.

*FGBOU VPO «Nizhny Novgorod State Technical University, n.a. R.E. Alekseev», Nizhny Novgorod, e-mail: PachurinGV@mail.ru*

Main gas pipelines in the European North of the country operated under difficult conditions, temperature and force, leading to the accumulation of plastic deformation in some areas. The emergence and development of fatigue damage is a multi-pipe steels and depends on the nature of the material, loading conditions and the structural state due to the operating conditions of pipelines themselves. The results of studies of changes in the properties of the original tubular steel 17GS defined by the original method using deformation characteristics microplastic. It is shown that through the ability to structure microplasticity can estimate the tendency of the material to the fragility. This meant not the absolute value of deformation before failure, and the existence of several deformation mechanisms by which it can be implemented. The original structure of the metal causes the appearance of specific deformation mechanisms in specific values of critical stresses. The deviation from the values of critical stresses in the material of the pipe to a certain value after the operation will indicate the suitability of pipe section for further exploitation.

**Keywords:** pipelines, pipe steel 17GS, microplastic deformation structure, the tendency to chalk fragility, deformation mechanisms, the critical voltage

Магистральные газопроводы на Европейском Севере страны эксплуатируются в сложных условиях. На обводненных территориях грунт обладает слабой защемляющей способностью, поэтому температурно-силовые воздействия на трубопровод в процессе эксплуатации приводят к накоплению пластической деформации на отдельных участках, не учитываемой расчетом [3]. Процесс усталостного разрушения металла трубы можно свести к нескольким видам процессов, определяющих накопление усталостных повреждений [9–11]. Появление и развитие усталостных повреждений трубных сталей является многостадийным и зависит от природы материала, условий нагружения [4] и структурного состояния [6], обусловленного условиями эксплуата-

ции самих трубопроводов. Эти процессы, будучи результатом воздействия сложных механизмов [7, 8], сначала проявляются как локальные пластические деформации. В работе сделана попытка выявить зависимость склонности материала к хрупкому разрушению не столько от условий нагружения, сколько от свойств самой структуры, приобретенных материалом в процессе эксплуатации трубопровода.

В настоящей работе приведены результаты исследований изменения первоначальных свойств трубной конструкционной низколегированной кремнемарганцовистой стали 17ГС, определенных по оригинальной методике с использованием характеристик микропластической деформации, определяемых на образцах диаметром

3,5 мм и высотой 7 мм, которые деформировались сжатием ступенчато возрастающей нагрузкой до предела текучести на специальном прессе большой жесткости ( $1/\kappa = 10^4$  МН/Н). Химический состав стали 17ГС представлен в табл. 1.

Массивное монолитное ядро, изготовленное из высокопрочной стали, клиновое деформирующее устройство, мембраны, предотвращающие смещение нижней траверсы в горизонтальной плоскости, обеспечивают высокую жесткость деформирующего устройства и исключают перекокс образца при испытаниях. Высокая жесткость испытательного устройства необходима для исключения возможного вклада машины в регистрируемую величину релаксации напряжений. Для регистрации величины падения напряжений в процессе испытания используется датчик силы, который представляет собой стальное упругое тело с наклеенными на него по мостовой схеме тензодатчиками. Сигнал с датчика через усилитель с компенсирующим устройством подается на самопишущий реги-

стрирующий прибор, который записывает кривую падения напряжения после каждого цикла нагружения образца.

Величина изменения релаксации напряжений ( $\Delta\sigma_i$ ) (рис. 1, а) измерялась при ступенчатом увеличении нагрузки ( $\sigma_H$ ) на постоянную величину ( $\Delta\sigma_H$ ) через равные промежутки времени ( $\Delta t = 150$  с). Затем строились зависимости  $\Delta\sigma(\sigma_H)$ , отражающие поэтапное развитие пластической деформации при нагружении до предела текучести (рис. 1 б). В зависимости от степени упрочнения стали в этом интервале напряжений наблюдается в основном от 2 до 5 стадий характера деформации, ограниченных критическими напряжениями  $\sigma_1^0$ ,  $\sigma_1'$  и  $\sigma_1''$  (рис. 1 б), которые вместе с соответствующими величинами падения напряжения (рис. 1, б) могут характеризовать способность металла сопротивляться малым пластическим деформациям. Именно эти величины были приняты за характеристики микропластической деформации (ПМД), используемые в данной работе [2].

Таблица 1

Химический состав в % стали 17ГС (ГОСТ 19281 – 89)

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	N	Cu	As
0,14–0,2	0,4–0,6	1–1,4	до 0,3	до 0,04	до 0,035	до 0,3	до 0,008	до 0,3	до 0,08

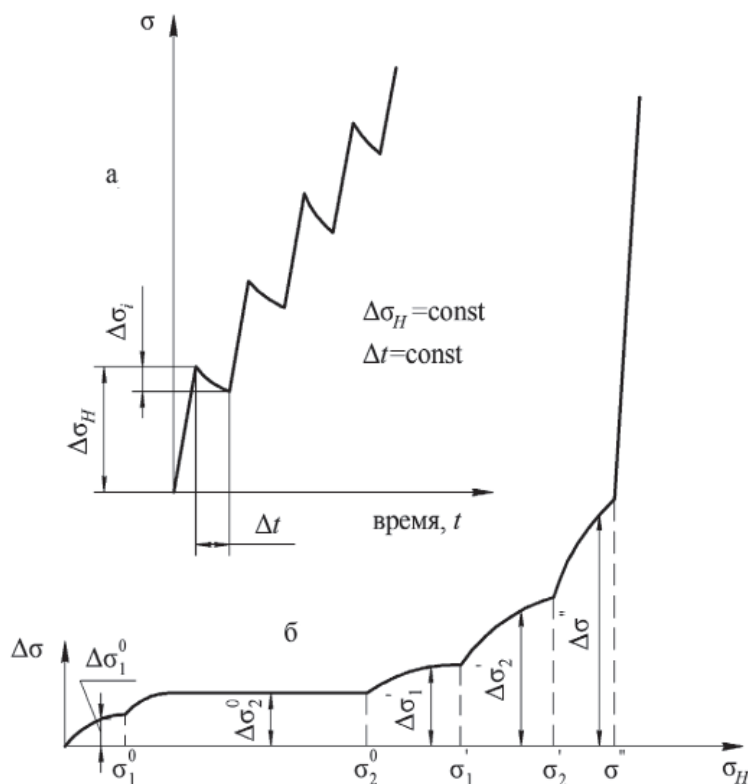


Рис. 1. Схема нагружения при испытаниях (а) и схема полученной зависимости (б)

Из различных мест участка газопровода Ухта – Торжок длиной 100 м, подлежащего ремонту после эксплуатации в течение 15 лет, были вырезаны темплеты (карта 400×400 мм) и из них были изготовлены образцы для определения ПМД. В этом месте произошло деформирование участка трубопровода в горизонтальной плоскости со стрелой прогиба 6 м (рис. 2).

Темплеты вырезались на участках, где труба подвергалась наибольшей деформации. В качестве исходных значений параметров микропластической деформации принимались данные испытаний образцов, вырезанных из трубы запаса, не бывшей в эксплуатации.

Первая группа образцов характеризуется разной степенью остаточных деформаций, полученных в результате эксплуа-

ционной нагрузки. Так, максимальные напряжения на этом участке трубы, определенные расчетом, составили 340 МПа в районе карты 4. Образцы карт 3 и 5 вырезались на расстоянии 15 и 22 м от карты 4 и характеризуются меньшими значениями параметров напряженно-деформированного состояния материала трубы.

Графики изменения ПМД для образцов, вырезанных из разных участков трубы, показаны на рис. 3 а, б. Как видно из соответствующих графиков, параметры  $\sigma_2^0$ ,  $\sigma''$  и  $\Delta\sigma_2^0$  имеют разные значения в зависимости от места вырезки образца. Значения параметров  $\sigma_2^0$ ,  $\sigma''$  и  $\Delta\sigma_2^0$ , полученные для образцов, вырезанных из нескольких участков труб, отличающихся напряженно-деформированным состоянием в процессе эксплуатации трубопровода, приведены в табл. 2.

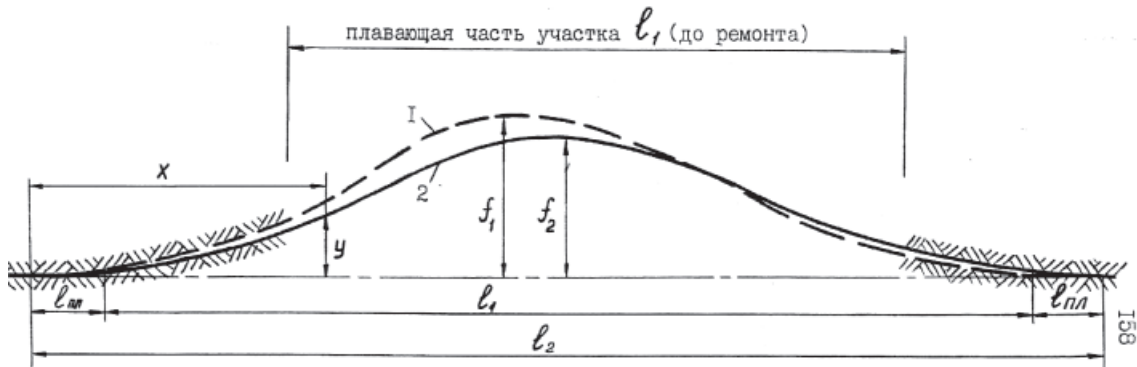


Рис. 2. Схема искривленных участков газопровода Ухта – Торжок:  
1 – ось трубы до ремонта; 2 – после ремонта; x, y – координаты сечений трубы;  
 $f_1$ ,  $l_1$  – прогиб трубы в вершине, длина участка до ремонта;  $f_2$ ,  $l_2$  – то же после ремонта

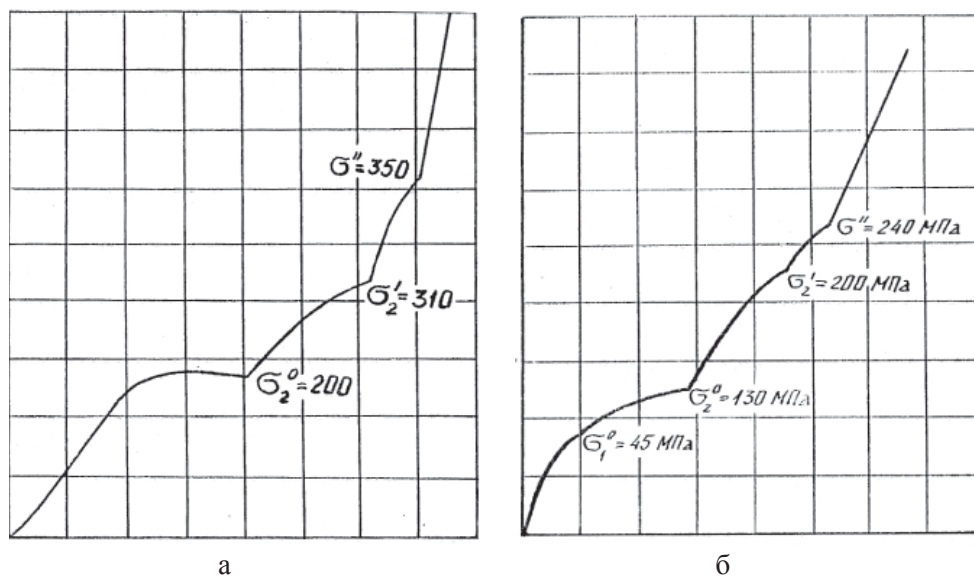


Рис. 3. График изменения параметров микропластической деформации для образца из стали 17ГС:  
а – исходное структурное состояние; б – карта 5. Продольное направление вырезки образца

Таблица 2

Значения параметров микропластической деформации для материала разных участков трубы

Место вырезки образца	$\sigma_1^0$ , МПа	$\sigma_2^0$ , МПа	$\sigma_2'$ , МПа	$\sigma''$ , МПа	$\Delta\sigma_2^0$ , МПа
Исходный	–	200	310	350	0,26
Карта 2	–	240	300	340	0,26
Карта 3	–	165	–	340	0,25
Карта 4	43	290	370	427	0,18
Карта 5	45	130	200	240	0,23

При сопоставлении данных, полученных в результате испытаний образцов, с определением конкретного места их вырезки, было установлено, что значения ПМД металла карт 4 и 5 отличаются от ПМД исходного металла трубы. При этом карта 4 была вырезана на внутреннем радиусе изгиба трубы, а карта 5 – на внешнем, то есть металл участка карты 4 деформировался сжатием довольно значительным усилием, а участок карты 5 подвергался деформации растяжением. Все это хорошо выявилось при анализе величин ПМД для соответствующих образцов. Таким образом, измерение микропластических характеристик металла трубы после эксплуатации в течение определенного периода и сравнение с данными, полученными при замере ПМД металла труб, не бывших в эксплуатации, позволяет сделать заключение о степени деформирования металла трубы в процессе эксплуатации.

Известно [4], что увеличение степени деформации сжатия приводит к изменению температуры перехода материала из пластического в хрупкое состояние и смещению ее в область более высоких температур.

Наиболее распространенный способ оценки склонности материала к хрупкому разрушению – определение температурной зависимости величины КСУ. Недостатками этого способа являются:

1) отсутствие физически аргументированного критерия ударной вязкости;

2) не показательность величины КСУ для высокопрочных состояний, так как с повышением прочности материала при уменьшении температуры испытания отсутствует явно выраженный порог хладноломкости.

В предполагаемом в настоящей работе способе определения момента перехода материала из пластического в хрупкое состояние производится по температурной зависимости параметра

$$A = \frac{(\Delta\sigma_2^0)^2}{\sigma_2^0},$$

определяемого по микропластическим характеристикам, получаемым в результате статического нагружения сжатием. Эта зависимость близка по температурному интервалу в зависимости КСУ (Т), однако величина  $A$  имеет определенный физический смысл:  $\Delta\sigma_2^0$  характеризует сопротивление движению дислокаций в матрице сплава в обход частиц выделений в пределах микропластической области до появления микротекучести, а величина  $\sigma_2^0$  характеризует напряжение, соответствующее смене дислокационного механизма деформации при переходе из микропластической области в промежуточную область деформации [4]. Таким образом, через способность данной структуры к микропластичности можно оценить склонность материала к хрупкости. При этом имеется в виду не абсолютная величина деформации перед разрушением, а существование нескольких механизмов деформации, с помощью которых она может быть реализована [1]. Исходная структура металла обуславливает появление определенных механизмов деформации при конкретных величинах критических напряжений. Отклонение от величин критических напряжений в материале трубы до определенных значений после эксплуатации будет свидетельствовать о пригодности участка трубы для дальнейшей эксплуатации.

#### Список литературы

1. А.С. 147839 СССР, МКЛ4 – G01N3/18. Способ определения температуры перехода материала из пластического в хрупкое состояние / С.А. Мадянов, Б.А. Апаев, В.К. Седов, Л.Т. Крюков, Ю.В. Кириллов.
2. Крюков Л.Т. Определение момента перехода материала из пластического состояния в хрупкое с использованием параметров микропластической деформации. Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. – № 2 (105). – Н. Новгород, 2013. – С. 48–53.
3. Лисин В.Н., Крюков Л.Т. Исследование прочности и усталости трубной стали 17ГС / Повышение эффективности нефтегазового строительства в условиях Севера. – М.: 1984. – С. 3–8.
4. Мадянов С.А., Апаев Б.А., Седов В.К., Крюков Л.Т. Определения температуры вязкохрупкого перехода в сталях

по параметрам их микропластической деформации / С.А. Мадьянов, В.А. Апаев, В.К. Седов, Л.Т. Крюков // Дислокационная структура в металлах и сплавах и методы ее исследования. – Тула, 1987. – С. 97–103.

5. Пачурин Г.В. Долговечность штампованных конструкционных материалов на воздухе и в коррозионной среде // Заготовительные производства в машиностроении. – 2003. – № 10. – С. 21–27.

6. Пачурин Г.В. Долговечность на воздухе и в коррозионной среде деформированных сталей // Технология металлов. – 2004. – № 12. – С. 29–35.

7. Пачурин Г.В. Долговечность пластически деформированных коррозионно-стойких сталей // Вестник машиностроения. – 2012. – № 7. – С. 65–68.

8. Пачурин Г.В. Повышение эксплуатационной долговечности нержавеющей сталей технологическим упрочнением // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 2 (Часть 2). – С. 28–33.

9. Pachurin G.V. Ruggedness of structural material and working life of metal components // Steel in Translation. – 2008. – № 3. – Т. 38. – P. 217–220.

10. Pachurin G.V. Ruggedness of structural material and working life of metal components // Steel in Translation. – 2008. – № 3. – Т. 38. – P. 217–220.

11. Pachurin G. V. Life of Plastically Deformed Corrosion-Resistant Steel // Russian Engineering Research. – 2012. – Vol. 32. – № 9–10. – P. 661–664.

12. Потак Я.М. Хрупкие разрушения стали и стальных деталей. – М.: Оборонгиз, 1955. – 389 с.

### References

1. A.S. 147839 SSSR, MKL4 G01N3/18. Sposob opredelenija temperatury perehoda materiala iz plasticheskogo v hrupkoe sostojanie / S.A. Madjanov, B.A. Apaev, V.K. Sedov, L.T. Krjukov, Ju.V. Kirillov.

2. Krjukov L.T. Opredelenie momenta perehoda materiala iz plasticheskogo sostojanija v hrupkoe s ispolzovaniem parametrov mikroplasticheskoj deformacii. Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta im. R.E. Alekseeva. no. 2 (105). N. Novgorod, 2013. pp. 48–53.

3. Lisin V.N., Krjukov L.T. Issledovanie prochnosti i ustalosti trubnoj stali 17GS / Povyshenie jeffektivnosti neftegazovogo stroitelstva v uslovijah Severa. M.: 1984. pp. 3–8.

4. Madjanov S.A., Apaev B.A., Sedov V.K., Krjukov L.T. Opredelenija temperatury vjazkohrupkogo perehoda v staljah po parametram ih mikroplasticheskoj deformacii / S.A. Madjanov, B.A. Apaev, V.K. Sedov, L.T. Krjukov // Dislokacionnaja struktura v metallah i splavah i metody ee issledovanija. Tula, 1987. pp. 97–103.

5. Pachurin G.V. Dolgovechnost shtampovannyh konstrukcionnyh materialov na vozduhe i v korrozionnoj srede // Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii. 2003. no. 10. pp. 21–27.

6. Pachurin G.V. Dolgovechnost na vozduhe i v korrozionnoj srede deformirovannyh stalej // Tehnologija metallov. 2004. no. 12. pp. 29–35.

7. Pachurin G.V. Dolgovechnost plasticheski deformirovannyh korrozionno-stojkih stalej // Vestnik mashinostroenija. 2012. no. 7. pp. 65–68.

8. Pachurin G.V. Povyshenie jekspluatacionnoj dolgovechnosti nerzhavejushhh stalej tehnologičeskim uprochneniem // Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamentalnyh issledovanij. 2014. no. 2 (Chast 2). pp. 28–33.

9. Pachurin G.V. Ruggedness of structural material and working life of metal components // Steel in Translation. 2008. no. 3. T. 38. pp. 217–220.

10. Pachurin G.V. Ruggedness of structural material and working life of metal components // Steel in Translation. 2008. no. 3. T. 38. pp. 217–220.

11. Pachurin G. V. Life of Plastically Deformed Corrosion-Resistant Steel // Russian Engineering Research. 2012. Vol. 32. no. 9–10. pp. 661–664.

12. Potak Ja.M. Hrupkie razrushenija stali i stalnyh detaliej. M.: Oborongiz, 1955. 389 p.

### Рецензенты:

Гаврилов Г.Н., д.т.н., профессор, Институт физико-химических технологий и материаловедения, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород;

Панов А.Ю., д.т.н., профессор, директор ИПТМ, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород.