

3. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах / В. И. Тимошпольский, И. А. Трусова, А. Б. Стеблов, И. А. Павлюченков. — Мн.: Выш. шк., 1992. — 217 с.

4. Эванс Ю. Р. Коррозия и окисление металлов. — М.: Машгиз, 1962. — 856 с.

5. Маковский В. А. Эмпирические формулы для выражения температурной зависимости теплофизических свойств стали // Сталь. — 1972. — № 1. — С. 87–89.

6. Велк Г. Формулы для расчета теплофизических свойств стали на ЭВМ // Черные металлы. — 1971. — № 5. — С. 48–50.

7. Расчет процесса нагрева проволоки в печах патентирования / Ю. А. Самойлович, В. И. Тимошпольский, В. В. Филиппов и др. // Литье и металлургия. — 2000. — № 1. — С. 51–52.

8. Решение задач управления нагревом металла на основе метода магистральной асимптотической оптимизации / В. И. Тимошпольский, С. М. Козлов, В. Б. Ковалевский и др. // Литье и металлургия. — 2000. — № 4. — С. 103–108.

Представлена НТС УНПО  
«БГПА — БМЗ»

Поступила 11.07.2001

УДК 658.264:621.643

## **ВЛИЯНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ НА МАЛОЦИКЛОВУЮ ПРОЧНОСТЬ САМОКОМПЕНСИРУЮЩИХСЯ ТРУБОПРОВОДОВ**

**Канд. техн. наук ЮХИМЕЦ П. С.**

*Институт электросварки имени Е. О. Патона НАН Украины*

**Канд. техн. наук ЯКОВЛЕВ Б. В.**

*РУП «БелНИПИэнергопром»*

**Кандидаты техн. наук ГУСЕНКОВ А. П., МОСКВИТИН Г. В.**

*Институт машиноведения имени А. А. Благонравова НАН России*

В 1985–1986 гг. были построены и начали эксплуатироваться опытно-промышленные участки тепловых сетей из самокомпенсирующихся труб (СКТ) диаметром 630 мм [1]. Прокладка СК трубопроводов в Минске (400 м) и Витебске (500 м) осуществлена канальным, а в Санкт-Петербурге (400 м) — бесканальными способами. Конструкция СК трубопроводов основывается на принципе непрерывной компенсации продольных перемещений, что достигается снижением осевой жесткости труб посредством введения в их стенку винтовых гофров [2].

Металл трубопроводов тепловых сетей испытывает воздействие нестационарных нагрузок [3]. Эти нагрузки, обусловленные изменением температуры и давления рабочей среды, могут быть причиной малоциклового разрушения СК трубопровода.

Известно, что долговечность конструкции определяется уровнем и характером изменения местных напряжений во времени, а также циклическими свойствами конструкционного материала [4].

В процессе изготовления СКТ конструкционный материал подвергается холодному пластическому деформированию, степень которого изменяется в зависимости от зоны расположения конструкции. Максимальное утонение стенки и соответствующая ему вытяжка металла при

изготовлении партии труб  $D_y = 630$  мм достигала в вершине гофра 10 %. Длительная эксплуатация трубопровода в интервале рабочих температур от 50 до 150 °С приводит к изменениям циклических свойств материала, которые, как и в случае пластического деформирования, могут происходить неравномерно. Учет реальных циклических свойств материала в наиболее нагруженных зонах конструкции является необходимым фактором определения ее остаточного ресурса.

В связи со сказанным выше были предусмотрены изучение циклических свойств материала СКТ в состоянии поставки и сопоставление их с данными испытаний конструкционного материала СК трубопроводов после 7 лет эксплуатации в Минских тепловых сетях.

Применительно к задачам оценки малоциклового прочностных изделий определение расчетных характеристик сопротивления малоциклового усталости конструкционного материала требует учета ряда специфических особенностей, прежде всего технологических: состояние материала, влияние на сопротивление малоцикловому деформированию и разрушению места и направления вырезки образцов, особенности работы металла сварного шва. Вопрос рационального выбора места вырезки образцов решался с учетом данных по напряженному состоянию конструкции из условия получения действительных характеристик сопротивления малоцикловому разрушению металла в зоне возможного достижения предельного состояния по малоцикловому разрушению конструкции. В этой связи вырезка заготовок производилась из следующих зон СКТ (рис. 1):

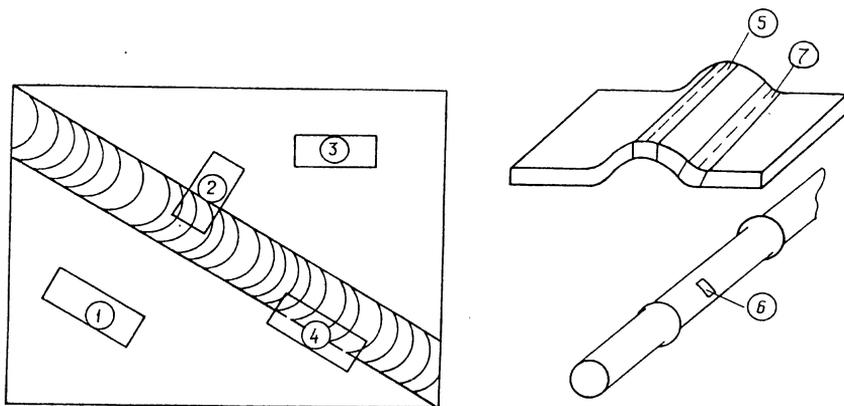


Рис. 1

1 — зона термического влияния с ориентацией вдоль спирального сварного шва;

2 — направление зоны перпендикулярно спиральному шву, средняя часть совпадает с линией сплавления;

3 — зона основного металла с ориентацией вдоль оси трубы;

4 — зона ориентирована вдоль шва, середина совпадает с линией сплавления;

5 — зона вершины гофра с ориентацией вдоль него;

6 — зона основного металла с ориентацией перпендикулярно оси трубы;

7 — зона основания гофра с ориентацией вдоль последнего.

Из полученных заготовок были выполнены образцы в соответствии с эскизами, приведенными на рис. 2. Поскольку толщина металла труб оказалась недостаточной для изготовления образцов со стандартными захватами, они выполнялись с навинчивающимися и завариваемыми по концам головками. Технология изготовления этих образцов предусматривала окончательную обработку всех размеров, включая приваренные головки, с одной установки в центрах.

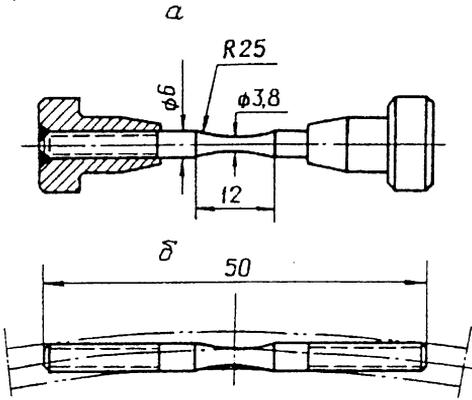


Рис. 2. а — образец в сборе; б — схема вырезки образца

Из каждой зоны СКТ в состоянии поставки, так же как и после 7 лет эксплуатации, было изготовлено 3–4 образца. Циклическое деформирование выполнено в условиях жесткого нагружения на испытательной машине УМЭ-10т.

Испытания проводились в условиях растяжения–сжатия при непрерывной регистрации параметров нагружения и деформирования. Точность регистрации параметров нагружения  $\pm 1-2\%$ . Испытания проходили с частотой нагружения 1 цикл/мин.

Нагружение образцов из материала труб в состоянии поставки проводилось в диапазоне циклических деформаций  $0,4\% < \epsilon_i < 2\%$ , при этом основное количество образцов испытывалось при деформациях, меньших 1%.

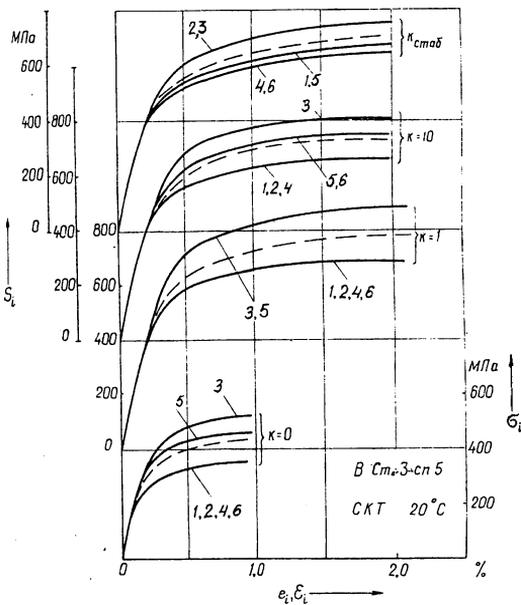


Рис. 3. - - - — осредненные диаграммы

В процессе испытаний получены изоциклические диаграммы деформирования материала ВСт.3сп5 из различных зон трубы (рис. 3). Данные диаграмм циклического деформирования материала в состоянии поставки показывают, что он является циклически стабилизирующимся. Стабилизация наблюдалась после 10–15 циклов нагружения. До этого материал проявлял свойства циклически упрочняющегося материала.

Диаграммы циклического деформирования после 7 лет эксплуатации подтверждают свойство циклической стабилизации материала. При этом материал зон 1–4 до наступления стабилизации (10–300 циклов) проявлял свойства циклически упрочняющегося, а материал зон 5–7 — циклически разупрочняющегося (10–150 циклов).

Результаты исследования малоциклового долговечности образцов материала СКТ в состоянии поставки и после эксплуатации представлены на рис. 4.

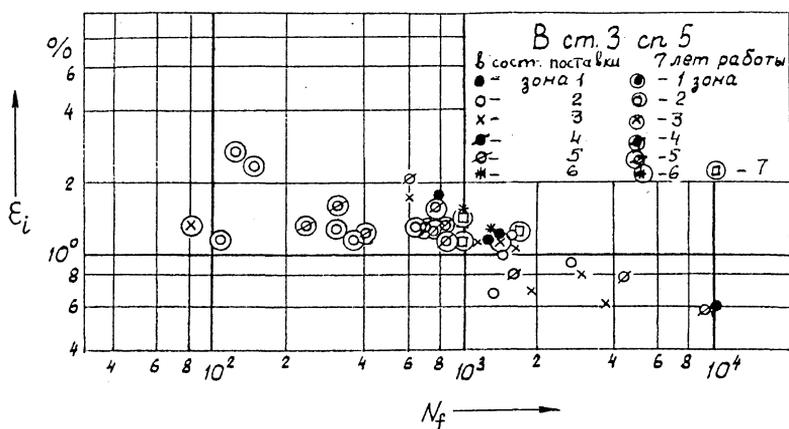


Рис. 4

Видно, что результаты испытаний образцов, вырезанных из гладкой части трубы, зоны сварного шва, а также зоны гофра, располагаются в общей полосе разброса. Поэтому долговечность конструкции после длительной эксплуатации, так же как и в состоянии поставки, определяется прежде всего уровнем циклических деформаций в гофрах, где они максимальны.

Разброс данных эксперимента типичен для испытаний в малоцикловом диапазоне чисел циклов до разрушения — значения долговечностей при одном и том же значении исходной деформации отличаются, приблизительно, на величину до одного порядка.

На рис. 5 представлены результаты обработки экспериментальных данных обеих серий испытаний методом наименьших квадратов безотносительно к зонам вырезки образцов. Здесь же для сравнения показана нормированная кривая (3) усталости для низкоуглеродистых сталей, обычно используемая при расчете долговечности [4]. Как следует из рис. 5, экспериментальные точки материала в состоянии поставки укладываются около линии регрессии 1 более плотно (коэффициент корреляции — 0,919). Снижение коэффициента корреляции результатов испытаний материала, бывшего в эксплуатации, объясняется неравномерностью влияния эксплуатационных факторов на механические свойства металла различных зон, а также более высоким уровнем задававшихся при испытании деформаций. Незначительное изменение угла наклона линии регрессии 2 свидетельствует о стабильности циклических свойств конструкционного материала. Некоторое снижение долговечности в малоциклового области ( $N_f < 10^4$ ) происходит в результате старения материала (увеличение прочности  $\sigma_B$  при одновременном снижении пластичности  $\psi$ ). Данный вывод мог бы быть более очевидным при снижении нижней границы циклических деформаций при испытаниях до

значения  $\Delta\epsilon_i = 0,2-0,3 \%$ , что, однако, связано с увеличением их продолжительности.

В целом в диапазоне нагружения, характерном для СК трубопроводов тепловых сетей ( $\Delta\epsilon_i < 1 \%$ ), результаты обеих серий испытаний независимо от зоны вырезки образцов укладываются в общей полосе разброса и имеют близкое отличие от нормативной кривой, которое при одних и тех же значениях  $\Delta\epsilon_i$  составляет 1,5 порядка.

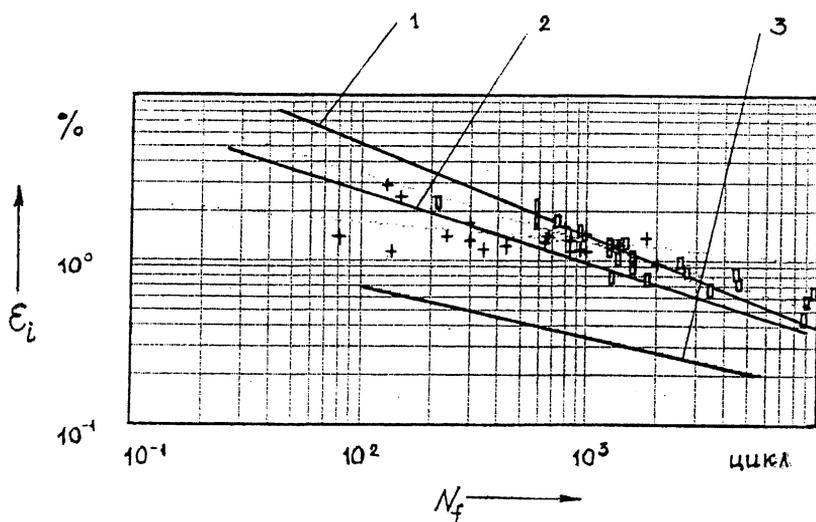


Рис. 5. □ — материал в состоянии поставки; 1 — линия регрессии; + — материал после эксплуатации; 2 — линия регрессии; 3 — нормативная кривая допустимых циклических деформаций:  $n_c = 2$ ;  $n_M = 10$

В результате проведенных исследований не обнаружены изменения свойств конструкционного материала, способствующие ускоренному разрушению СКТ в области нагрузок, характерных для тепловых сетей. Первоначальные опасения по поводу возможной активизации процесса коррозии металла в наиболее напряженных участках трубы — гофрах не подтвердились.

За прошедшее время СК трубопроводы показали хорошую компенсирующую способность и высокую надежность. Кроме натурных испытаний по выявлению изменения свойств металла, проводились замеры гидравлического сопротивления СК трубопроводов, которое оказалось в среднем в 1,7 раза выше, чем гладкостенных труб. То же показали и испытания модельных образцов СК трубопроводов на теплогидравлическом стенде. Однако выполненные в 1988—1991 гг. теоретические и экспериментальные исследования позволили улучшить геометрические параметры СК трубопроводов и снизить их гидравлическое сопротивление до величины, присущей традиционным трубопроводам из гладкостенных труб, оснащенным специальными компенсаторами осевых температурных удлинений. Выпуск СК трубопроводов диаметром 300—800 мм с улучшенной геометрией гофра и гидравликой планировалось на-

чать на Харцызском трубном заводе (Украина). Но в 1992 г. в связи с распадом СССР дальнейшее совершенствование и применение СК трубопроводов остановилось.

Сейчас вновь проявляется интерес к СК трубопроводам, и не исключено, что если они будут иметь такую же тепло- и гидроизоляцию, как предизолированные теплопроводы (ПИ-теплопроводы) типа АВВ, то смогут составить конкуренцию последним, учитывая, что для СК трубопроводов не требуется, как для ПИ-теплопроводов, высококачественная, а соответственно и дорогостоящая сталь, проще технология их монтажа, снимается температурное ограничение по теплоносителю, не ограничивается число циклов нагрева—охлаждения СК трубопровода.

При незначительном удорожании изготовления СК трубопроводов стоимость использования такой теплотрассы и эксплуатационные затраты оказываются на 20—25 % ниже, чем в обычных канальных конструкциях (при минераловатной изоляции), за счет отказа от компьютеров (радиальных, сальниковых, сильфонных) и камер для их установки, сокращения количества неподвижных и подвижных опор, полного исключения потерь теплоносителя и теплоты с утечками, технологичности и прогрессивности монтажа, а также упрощения эксплуатации. Причем эффект в равной степени приходится как на составляющие энерго-, так и материалосбережения. Например, на 1 кг подземной теплотрассы из СК трубопроводов диаметром 630 мм экономится 15—20 т металла, 18—20 т цемента, на производство которых требуется 9—11 т у. т. При бесканальной прокладке выигрыш еще больше.

Необходимо совместными усилиями энергетиков Украины, России и Беларуси возобновить производство СК трубопроводов различных диаметров.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Опы т проектирования и эксплуатации теплотрассы из самокомпенсирующихся труб в г. Минске / В. В. Болкунец, Б. В. Яковлев, П. С. Юхимец и др. // Энергетика и электрификация: Экспресс-информация, сер.: Сооружение ТЭС. — 1988. — Вып. 5. — С. 1—8.

2. Раевский Г. В., Лось А. О., Иванцов О. М. Трубы для газо- и нефтепроводов с непрерывным компенсатором осевых деформаций // Автоматическая сварка. — 1977. — № 2. — С. 16—19.

3. Ю х и м е ц П. С. Эксплуатационная нагруженность сварных трубопроводов тепловых сетей // Автоматическая сварка. — 1997. — № 3. — С. 19—22.

4. К о г а е в В. П., М а х у т о в Н. А., Г у с е н к о в А. П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность. — М.: Машиностроение, 1985. — 224 с.

Поступила 25.06.2001