



УДК 696.133

А. С. АИСТОВ, канд. техн. наук, доц., проф. кафедры общей физики и теоретической механики; **О. И. ВЕДЯЙКИНА**, канд. физ.-мат. наук, доц., доц. кафедры общей физики и теоретической механики

ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ И ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ ПРИ МАЛОМ ЧИСЛЕ ЦИКЛОВ НАГРУЖЕНИЯ

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет». Россия, 603952, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65.

Тел.: (831) 430-55-02; эл. почта: oft@nngasu.ru

Ключевые слова: долговечность, малоцикловая прочность, сварные соединения, число циклов, нагрузка, разрушение.

Представлены результаты исследования ряда конструкционных материалов (17ГС, 14ХГС и 10Г2С1) и труб большого диаметра (720 и 820 мм.) при малоцикловом нагружении. Установлено, что в диапазоне числа нагружений $2 \cdot 10^2 \div 3 \cdot 10^4$, независимо от типа материала данные по долговечности образцов при жестком нагружении образуют единую полосу разброса. Получена расчетная кривая допустимых циклических деформаций и чисел циклов нагружений для низколегированных трубных сталей.

При оценке надежности и долговечности (ресурса) тонкостенных конструкций (труб большого диаметра) с технологическими дефектами возникает необходимость учета реальных условий их эксплуатации, а именно, повторно-статический характер при малом числе циклов нагружений. Малоцикловая прочность конструкций и их элементов определяются, с одной стороны, кинетикой напряженного и деформированного состояния в зонах концентрации, связанной с накоплением односторонней деформации или накоплением повреждений и, с другой стороны, сопротивлением разрушению материалов при однородном напряженном состоянии в процессе циклического нагружения [1-3]. Как показано в работе [4], характер разрушения при циклическом нагружении наряду с некоторыми внешними факторами (силовые, конструктивные, условия испытания) в значительной мере связан с закономерностью изменения механических свойств при повторных нагружениях. Исследованию изменений диаграммы деформирования металлов при циклическом деформировании посвящены многие работы [1-2, 4-6].

Диаграмму циклического деформирования принято представлять как совокупность кривых деформирования в каждом из k -полуциклов с началом координат в точке, соответствующей началу разгрузки в каждом полуцикле (рис. 1).

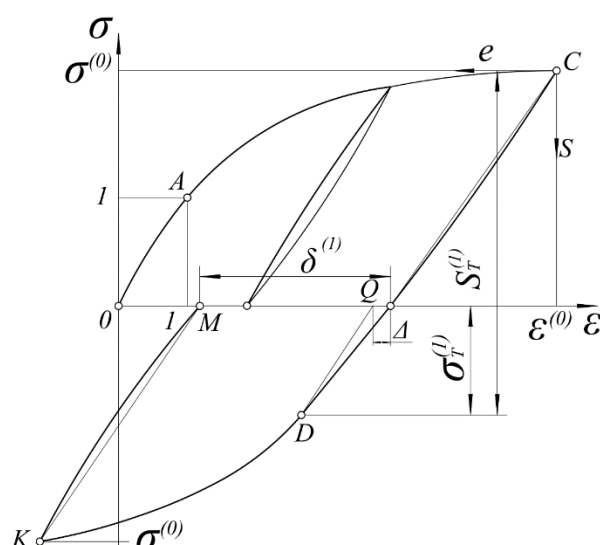


Рис. 1. Построение диаграммы циклического деформирования в k -ом полуцикле

Кривая циклического деформирования в k -ом полуцикле обычно выражается в относительных координатах:

$$\bar{S} = \frac{s}{\sigma_{\text{пц}}} \quad \text{и} \quad \bar{e} = \frac{e}{\varepsilon_{\text{пц}}} \quad (1)$$

Экспериментальными исследованиями в работах С. В. Серенсена, Р. М. Шнейдоровича, Н. А. Махутова и А. П. Гусенкова [1, 4-7] установлено, что ширина петли упругопластического гистерезиса $\bar{\delta}^{(k)}$ в процессе циклического деформирования различных металлов может уменьшаться, увеличиваться или стабилизироваться. В соответствии с этим принято разделять материалы на упрочняющиеся (В-96, Д-16Т, АК-8), разупрочняющиеся (теплоустойчивые стали, чугуны) и циклически стабильные (1Х18Н9Т, ст. 45). Отмечено [1-2], что на интенсивность изменения $\bar{\delta}^{(k)}$ в значительной степени влияет величина исходного деформирования $\bar{\varepsilon}^{(0)}$.

Закономерности циклического упруго-пластического деформирования и разрушения устанавливаются по результатам соответствующих лабораторных испытаний образцов при однородном напряженном состоянии (растяжении–сжатии или кручении тонкостенных трубок). Распространенными при малоцикловых испытаниях являются испытания при постоянстве от цикла к циклу максимальных упруго-пластических деформаций (жесткое нагружение) или нагрузок (мягкое нагружение). Указанных типов испытаний оказывается достаточным для установления основных закономерностей циклического упругопластического деформирования и критериев малоциклового разрушения. Если при мягком нагружении деформации изменяются от цикла к циклу, то при жестком нагружении максимальная величина упруго-пластических деформаций ограничена, и от цикла к циклу изменяются максимальные напряжения за счет перераспределения упругой и пластической частей деформаций.

Сопротивления разрушению при жестком нагружении изучалось в работах Л. Ф. Коффина [8], С. С. Мэнсона [9], Р. М. Шнейдоровича, А. П. Гусенкова



[1, 4-5] и других. Большой известностью пользуется выражение Коффина-Мэнсона [6, 9], определяющее связь между величиной пластической деформации и числом циклов до разрушения:

$$\varepsilon_{\text{пл}} N^m = C_{\Psi}, \quad (2)$$

где: $\varepsilon_{\text{пл}}$ – величина пластической деформации цикла, N – число циклов до разрушения, C_{Ψ} и m – константы материалов.

По данным Коффина [8] величина C_{Ψ} может быть определена по удлинению при разрыве при одноосном растяжении:

$$C_{\Psi} = \frac{1}{2} \varepsilon_B = \frac{1}{2} \ln \frac{1}{1-\Psi}, \quad (3)$$

где ε_B – пластическая деформация при разрыве, Ψ – относительное сужение при разрыве. Величина коэффициента m для большинства материалов равна 0,5.

Зависимость (2) выражает прямолинейную связь между пластической деформацией и числом циклов в координатах $\lg \varepsilon_{\text{пл}} - \lg N$. С. Мэнсон, проверяя зависимость (2), установил, что для 29 материалов с контрастными циклическими свойствами лучшая сходимость данной зависимости с экспериментальными данными имеет место при $m = 0,6$ [9]. В той же работе С. Мэнсон выразил связь между полной упругопластической деформацией и числом циклов в виде единой зависимости. При этом полная деформация определялась как сумма пластической $\varepsilon_{\text{пл}}$ и упругой деформации $\varepsilon_{\text{упр}}$:

$$\Delta = \varepsilon_{\text{пл}} + \varepsilon_{\text{упр}} = D^{0,6} N^{-0,6} + C N^{-0,12} \quad (4)$$

где:

$$D = \ln \frac{1}{1-\Psi} \quad \text{и} \quad C = 3,5 \frac{\sigma_B}{E} \quad (5)$$

Зависимость (5) справедлива при жестком нагружении. В работах Р. М. Шнейдеровича [4] установлено, что при жестком нагружении с асимметрией цикла деформацией $r = \frac{\varepsilon_{\text{мин}}}{\varepsilon_{\text{макс}}}$ прочность определяется амплитудными значениями деформации ε_a . Экспериментальные точки как симметричного, так и асимметричного цикла в координатах $\lg \varepsilon_a - \lg N$ образуют единую кривую малоциклового прочности.

Проведенные в работе [6] исследования сталей 45 и I5X2МФ при симметричном цикле $r = -1,0$ и асимметричных $r = -(0,75 \div 0,5)$ подтвердили результаты работ [4]. При жестком асимметричном нагружении полученные экспериментальные точки полностью совпадают с точками симметричного нагружения и образуют кривую малоциклового прочности как стабильной стали 45, так и для разупрочняющейся стали I5X2МФ.

Следовательно, деформационные и прочностные характеристики, полученные при одноосном растяжении – сжатии при жестком нагружении и $r = -1,0$, могут быть использованы при теоретическом и экспериментальном исследовании напряженного состояния труб большого диаметра в зонах концентрации напряжений.

Изучение кривых циклического деформирования может проводиться в двух направлениях: с одной стороны, существенно знать изменение предела пропорциональности $\bar{\varepsilon}_{\text{пц}}^{(k)}$ при циклическом деформировании, а с другой – изменение формы кривых деформирования от цикла к циклу.

Испытание образцов из основного металла сталей I7ГС, I4ХГС и 10Г2С1 при напряжениях выше их предела пропорциональности показали [10], что в процессе циклического нагружения происходит стабилизация петли гистерезиса $\bar{\delta}^{(k)}$ упругопластического деформирования в течение 8÷10 полуциклов нагружения. На рис. 2 в качестве примера представлена диаграмма деформирования для стали 10Г2С1 при симметричном цикле деформаций. Запись последующих циклов не нанесена на данном рисунке, чтобы не затемнять диаграмму. После некоторого упрочнения в течение первых десяти циклов нагружения стабилизированная петля пластического гистерезиса сохраняется вплоть до момента образования макротрещины.

Систематическое исследование свойств диаграмм циклического деформирования конструкционных материалов с контрастными свойствами показало [1-2], что по параметру числа полуциклов в диапазоне мягкого и жесткого нагружения диаграммы циклического упругопластического деформирования образуют, независимо от типа нагружения, обобщенную диаграмму циклического деформирования.



Рис. 2. Стабилизированная петля циклического пластического гистерезиса в зоне жесткого нагружения

При построении обобщенной диаграммы в относительных координатах

$$\bar{S} - \bar{e} \quad (6)$$

зависимость между циклическими напряжениями и деформациями в пределах упругого участка обобщенной диаграммы может быть выражена в виде [1]:

$$\bar{e}^{(k)} = \bar{S}, \quad (7)$$

а в пределах упругопластического участка:

$$\bar{\epsilon}^{(k)} = \bar{S} + \bar{\epsilon}_p^{(k)} \approx \bar{S} + \bar{\delta}^{(k)} \quad (8)$$

где: $\bar{\epsilon}_p^{(k)}$ – пластическая составляющая деформации на данном уровне напряжений $\bar{S}$; $\bar{\delta}^{(k)}$ – ширина петли гистерезиса, которая наблюдается после разгрузки с данного уровня напряжений.

Отсюда следует, что для построения обобщенной диаграммы нужно знать ширину пластического гистерезиса при разных уровнях исходных деформаций $\bar{\epsilon}^{(0)}$ и различных числах полуциклов нагружений "k".

На основании экспериментальных исследований для упрочняющихся материалов установлено, что для них характерен степенной закон изменения ширин петель пластического гистерезиса с ростом числа циклов нагружений [1-2]:

$$\bar{\delta}^{(k)} = \bar{\delta}^{(1)} \frac{1}{k^\alpha} \quad (9)$$

где: $\bar{\delta}^{(1)}$ – ширина петли пластического гистерезиса в первом полуцикле нагружения, k – число полуциклов нагружений, α – коэффициент, зависящий от состояния материала.

В системе двойных логарифмических координат зависимость (9) выражается прямой линией. Анализ экспериментальных данных по диаграммам циклического упругопластического деформирования показал, что в первом полуцикле нагружения (считая исходное нагружение за нулевое) зависимость петли гистерезиса $\bar{\delta}^{(1)}$ от степени исходного деформирования $\bar{\epsilon}^{(0)}$ является линейной:

$$\bar{\delta}^{(1)} = A \left(\bar{\epsilon}^{(0)} - \frac{\bar{S}_{\text{пц}}^{(1)}}{2} \right), \quad (10)$$

где: $\bar{\epsilon}^{(0)}$ – степень исходного деформирования, A – константа материала, характеризующая сопротивление деформированию в первом полуцикле нагружения, $\bar{S}_{\text{пц}}^{(1)}$ – циклический предел пропорциональности в первом полуцикле нагружения.

Для разупрочняющихся материалов присущ экспоненциальный закон изменения петель гистерезиса с числом полуциклов нагружения [1]:

$$\bar{\delta}^{(k)} = \bar{\delta}^{(1)} \cdot e^{\beta(k-1)} = A \left(\bar{\epsilon}^{(0)} - \frac{\bar{S}_{\text{пц}}^{(1)}}{2} \right) e^{\beta(k-1)}, \quad (11)$$

где: e – основание натурального логарифма, β – коэффициент, зависящий от состояния материала.

Приняв допущение о независимости предела пропорциональности $\bar{S}_{\text{пц}}^{(k)}$ от числа полуциклов нагружения и пренебрегая изменением циклического упругопластического деформирования, могут быть определены по диаграмме исходного деформирования и известным характеристикам A , $\bar{S}_{\text{пц}}^{(k)}$, α и β [1] в форме:



$$\bar{e}^{(k)} = \bar{S} + A \left[f\left(\frac{\bar{S}}{2}\right) - \frac{\bar{S}_{\text{пц}}^{(1)}}{2} \right] \frac{1}{k^\alpha} \quad (12)$$

для циклически упрочняющихся материалов, и

$$\bar{e}^{(k)} = \bar{S} + A \left[f\left(\frac{\bar{S}}{2}\right) - \frac{\bar{S}_{\text{пц}}^{(1)}}{2} \right] e^{\beta(k-1)} \quad (13)$$

для циклически разупрочняющихся материалов.

Закономерность изменения ширины петель гистерезиса с числом полциклов нагружения у циклически стабилизирующих материалов может удовлетворительно выражаться в форме как степенного, так и экспоненциального уравнений. Используя степенной закон на участке упрочнения $k=10$, уравнение обобщенной диаграммы циклического деформирования может быть записано в форме (12).

На участке стабилизации уравнение примет вид:

$$\bar{e}^{(k)} = \bar{S} + \frac{A}{10^\alpha} \left[f\left(\frac{\bar{S}}{2}\right) - \frac{\bar{S}_{\text{пц}}^{(1)}}{2} \right] \quad (14)$$

На рис. 3 приведена стабилизированная обобщенная диаграмма циклического деформирования исследованных низколегированных сталей.

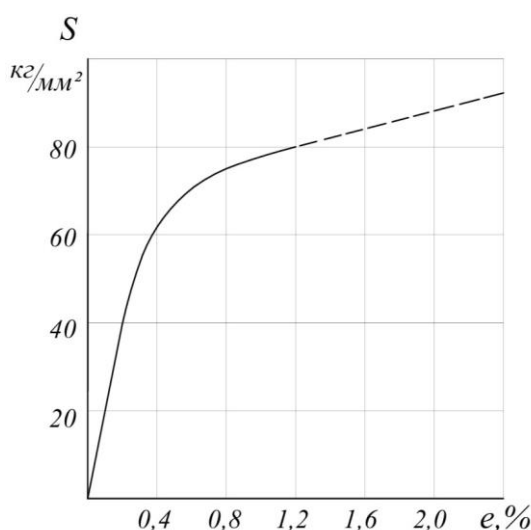


Рис. 3. Обобщенная стабилизированная диаграмма циклического деформирования низколегированных трубных сталей

Переход от системы координат $\bar{S} - \bar{e}$ к системе $\bar{\sigma} - \bar{\epsilon}$ может быть выполнен по формулам [4]:

$$\bar{\sigma}^{(k)} = \bar{\sigma}^{(k-1)} + (-1)^k \bar{S}^{(k)}, \quad (15)$$

$$\bar{\epsilon}^{(k)} = \bar{\epsilon}^{(k-1)} + (-1)^k \bar{e}^{(k)}, \quad (16)$$

где: $\bar{\sigma}^{(k-1)}$ и $\bar{\epsilon}^{(k-1)}$ – конечные значения напряжений и деформаций в $(k-1)$ -м полцикле.

Приведенные экспериментальные зависимости были получены при симметричном цикле в процессе мягкого нагружения.

Изучение свойств диаграмм циклического деформирования ряда материалов при жестком нагружении показало соответствие характера изменения с диаграммами при мягком нагружении [1, 4].

Проведенные в настоящей работе испытания стале 17ГС, 14ХГС и 10Г2С1 полностью подтвердили результаты работ [1-2, 4, 10]. Изменение напряжений при жестком нагружении может быть определено с помощью уравнения (14), преобразованного к виду:

$$\bar{S}^{(k)} = \Delta - \frac{A}{10^\alpha} \left[f\left(\frac{\bar{S}}{2}\right) - \frac{\bar{S}_{\text{пц}}^{(1)}}{2} \right], \quad (17)$$

где Δ – размах деформации при жестком нагружении.

Данные циклически стабилизирующиеся стали не изменяют сопротивления деформированию при числе полуциклов $k=10$.

Абсолютные значения циклических пределов пропорциональности исследованных материалов близки между собой и осредненное их значение равно:

$$\bar{S}_{\text{пц}}^{(1)} = 1. \quad (18)$$

Значение коэффициента A , характеризующего сопротивление деформированию данных материалов в первом полуцикле нагружения близко к единице. Абсолютное осредненное значение коэффициента равно:

$$A = 0,96. \quad (19)$$

Ввиду того, что стали 17ГС, 14ХГС и 10Г2С1 являются циклически стабилизирующимися материалами, константа α , характеризующая скорость изменения пластических деформаций с числом полуциклов нагружения, близка к нулю ($\alpha \cong 0$).

Особенности кинетики изменения диаграмм деформирования при повторном малоцикловом нагружении тесно связаны с характером разрушения. Возможны два типа разрушения, наблюдаемые при растяжении-сжатии в упругопластической области: разрушение, связанное с накоплением повреждений, и квазистатическое разрушение, обусловленное накоплением пластической деформации до уровня деформации соответствующей разрушению при однократном статическом нагружении. Как правило, разрушение от накопления повреждений соответствует большей долговечности и квазистатическое разрушение предшествует ему.

Сопротивление разрушению при малоцикловом жестком нагружении выражается в амплитудах упругопластических деформаций. При этом в качестве расчетных зависимостей используются степенные уравнения, связывающие предельное число циклов и амплитуду или размах деформации. На рис. 4 кривая (1) проведена по уравнению Мэнсона (4) для случая жесткого нагружения при симметричном цикле. Результаты экспериментов, выполненные на сталях 10Г2С1, 17ГС и 14ХГС при жестком нагружении, представлены на этом рисунке. По оси ординат отложены размахи упругопластической деформации

$$\Delta = \varepsilon_{\text{пл}} + \varepsilon_{\text{упр}}, \quad (20)$$

а по оси абсцисс – числа циклов N до разрушения образцов.

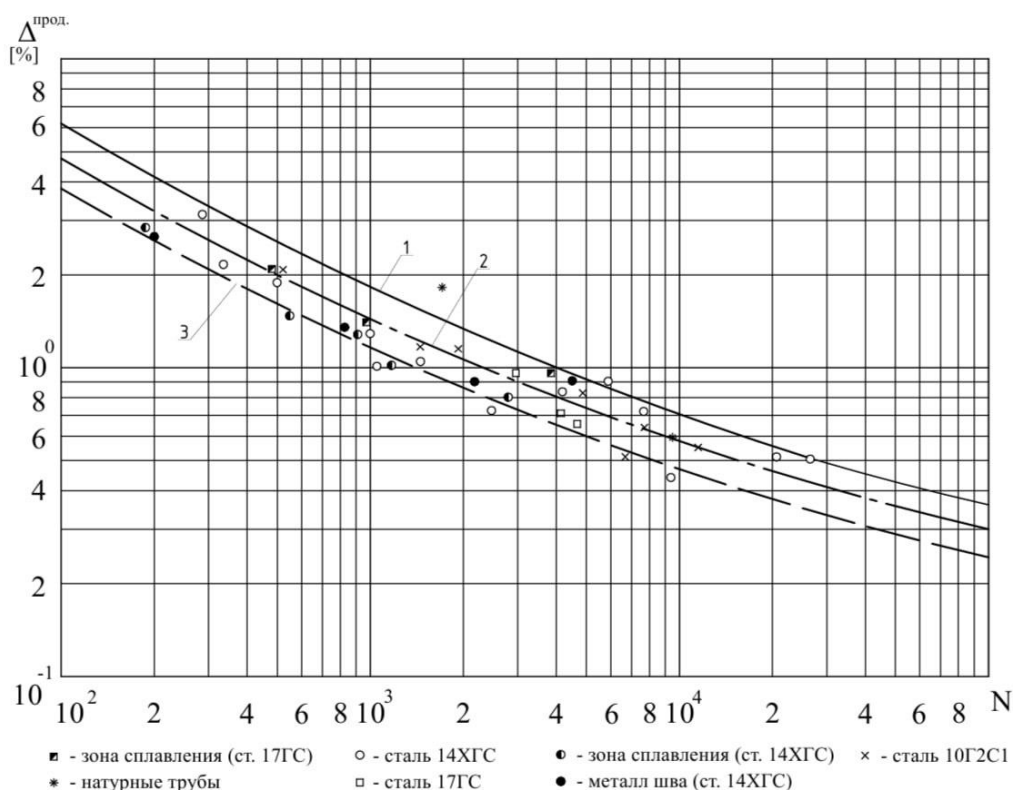


Рис. 4. Результаты экспериментов исследованных конструкционных материалов и реальных труб большого диаметра: 1 – кривая по Мэнсону, 2 и 3 – расчетные кривые для средних и минимальных параметров прочности исследуемых материалов

Характерно, что в диапазоне числа нагружений $2 \cdot 10^2 \div 3 \cdot 10^4$ независимо от типа материала данные по долговечности образцов при жестком нагружении образуют единую полосу разброса. Также в полосу разброса данных по разрушению гладких цилиндрических образцов из основного металла укладываются и результаты испытаний сварных образцов с рабочей частью в зоне перехода от основного металла к наплавленному. Таким образом, исследование малоциклового прочностного сопротивления деформированию на корсетных образцах с использованием поперечного деформометра показало для данных сталей, что технология сварки обеспечивает равнопрочность основного металла и металла сварного соединения.

Результаты испытаний малоциклового прочностного сопротивления сварных труб при повторном нагружении их внутренним давлением приведены в таблице. Как видно, уровень номинальной напряженности труб достаточно высок и соответствует даже уровню в безмоментной зоне вдали от мест концентрации.

Таблица

Результаты исследований долговечности труб большого диаметра при малоцикловых нагрузках внутренним давлением

№	Сечение труб	Марка стали	Пульсир. давление	$\sigma_{\tau}^{\text{ном}}$	$\sigma_i^{\text{ном}}$	$\frac{\sigma_i^{\text{ном}}}{\sigma_{\text{пц}}}$	$\varepsilon_{\tau}^{\text{ном}}$	$\varepsilon_i^{\text{max}}$	$\frac{\varepsilon_i^{\text{max}}}{\varepsilon_{0.2}}$	Число циклов до разрушен.
	мм		МПа	МПа	МПа		%	%		N
1	720x11	14ХГС	800	263	228	0,912	0,111	2,060	5,53	1672
2	720x11	14ХГС	800	266	230	0,920	0,112	0,820	2,26	4445
3	820x11	17ГС	700	257	224	0,897	0,108	0,604	1,49	9265
4	820x9	17ГС	580	269	233	0,932	0,114	0,204	0,53	$25 \cdot 10^3$

Поскольку разрушение при малоцикловом нагружении связано с величиной местных деформаций, проведем сопоставление величин максимальных деформаций в зоне наибольшей концентрации напряжений в трубах и чисел циклов до их разрушения (табл.) с результатами исследований гладких образцов из основного металла и из стыковых соединений в режиме жесткого нагружения. Звездочками (*) на рис. 4 обозначены максимальные размахи местных деформаций в исследованных трубах (№1, №2, №3 и №4) и фактические долговечности до образования течи в них. Из рисунка видно, что данные по разрушению сварных труб большого диаметра укладываются в полосу данных по гладким образцам. Совпадение результатов испытаний гладких образцов и сварных труб еще раз подтверждает, что в зоне наибольшей концентрации напряжений характер нагружения близок к жесткому.

Отмеченное обстоятельство дает возможность использовать для расчетной оценки прочности сварных труб большого диаметра кривые малоциклового разрушения материалов, полученные в условиях жесткого нагружения. Аналитическим выражением кривой малоциклового разрушения (кривая 1, рис. 4.) может быть уравнение Мэнсона в форме (4, 5).

Для средних и минимальных чисел долговечности параметры уравнения равны следующим значениям:

$$D = 0,656, C = 93,2 \cdot 10^{-4} \text{ – для кривой 2,} \quad (21)$$

$$\text{и } D = 0,516, C = 78,8 \cdot 10^{-4} \text{ – для кривой 3.} \quad (22)$$

Использование статических характеристик прочности и пластичности материала (ψ и σ_b) дает расчет, идущий, как в ряде случаев [6], не в запас прочности.

Для определения долговечности сварных труб, имеющих геометрические концентраторы напряжений, кроме кривой малоциклового разрушения, полученной на образцах из их материалов при жестком нагружении, необходимо также знать размах полной деформации в зоне наибольшей концентрации. Полученные в настоящей работе экспериментальные сведения позволяют провести анализ работоспособности сварных труб высокого давления при повторно-статическом нагружении с учетом их технологического оформления, характеризуемого значением коэффициента концентрации напряжений α_{σ} [10]. Учитывая, что исследованные материалы имеют приблизительно равное сопротивление малоцикловому разрушению, следует отметить, что технологические дефекты



сварки приводят к значительному снижению работоспособности труб в процессе повторного нагружения их внутренним давлением.

Наибольшее снижение малоциклового прочностного ресурса сварных труб отмечается при наличии в них смещения кромок в сварном шве. Для случая смещения в 1 мм $\alpha_\sigma = 2$, для случая смещения в 2 мм $\alpha_\sigma = 4,1$, а для случая смещения кромок в 3 мм с наличием угловатости в области продольного сварного шва $\alpha_\sigma = 8,0$. При рабочих давлениях, вызывающих в безмоментной зоне упругие деформации порядка $115 \cdot 10^{-5}$, долговечность труб для условий концентрации при $\alpha_\sigma = 2$ составляет $N > 2,5 \cdot 10^4$, при $\alpha_\sigma = 4,1$ $N = 9,2 \cdot 10^3$, при $\alpha_\sigma = 4,7$ $N = 4,4 \cdot 10^3$ и при $\alpha_\sigma = 8,0$ $N = 1,6 \cdot 10^3$.

Долговечность труб в условиях повторно-статического нагружения внутренним давлением может быть обеспечена на уровне порядка $7 \cdot 10^4$ циклов при ужесточении технологических требований на допускаемые дефекты сварных швов и отклонения геометрии сечения труб от круглой формы. Для этого необходимо уменьшить допуск на смещение кромок в сварном шве (превышение кромок) до 1 мм против допускаемого в настоящее время по техническим условиям – 3 мм. Вместе с этим, чтобы обеспечить необходимую долговечность труб высокого давления, не снижая уровня номинальных напряжений (соответственно уровня рабочих давлений), необходимо ужесточение допускаемого отклонения на овальность труб, так как ось продольного сварного шва совпадает с точками зоны повышения напряжений, обусловленной овальностью сечений. Кроме этого, необходимо повысить требование по улучшению качества изготовления сварных швов. В частности, следует исключить из разряда нефтепроводных трубы с подрезами внутренних швов.

При соблюдении указанных технологических требований на изготовление труб в процессе эксплуатации нефтепроводов может быть обеспечена расчетная долговечность труб $7 \cdot 10^3$ циклов с запасом по долговечности порядка 10, требуемым нормами [11]. Величина данного коэффициента запаса по долговечности обуславливается наличием возможных дополнительных технологических и эксплуатационных факторов, а именно: необнаруженные поры, включения, подрезы, влияние среды и другие факторы.

Выводы

При рабочем количестве циклов нагружения и 10-ти кратном запасе по долговечности (n_N), запас по амплитуде разрушающих деформаций для труб из низколегированных сталей составит $n_\epsilon = 2,0$ согласно [11]. На рис. 5 представлена расчетная кривая допустимых циклических деформаций и чисел циклов нагружений для низколегированных трубных сталей (при $\frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_B} \leq 0,6$), уравнение которой может быть описано следующей формулой:

$$[\Delta\epsilon] = 0,28[N]^{-0,6} + 43 \cdot 10^{-4}[N]^{-0,12} \quad (23)$$

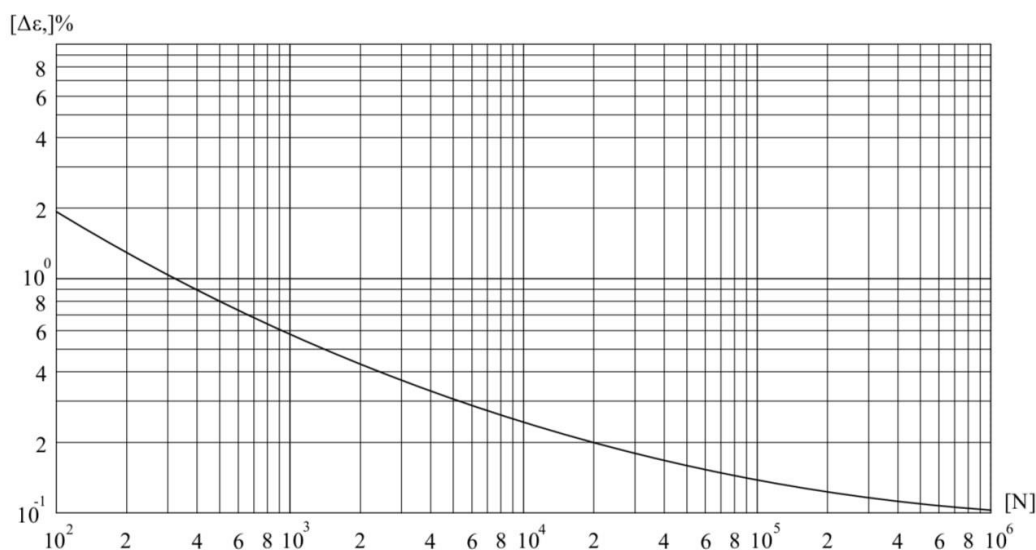


Рис. 5. Расчетная кривая допустимых циклических деформаций для низколегированных трубных сталей

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гусенков, А. П. Прочность при изотермическом и неизотермическом малоцикловом нагружении / А. П. Гусенков. – Москва : Наука, 1979. – 295 с. – Текст : непосредственный.
2. Аистов, А. С. Исследование малоциклового прочностного поведения труб большого диаметра магистральных газо- и нефтепроводов / А. С. Аистов, А. П. Гусенков. – Текст : непосредственный // Машиноведение. – 1975, № 3. – С. 61–71.
3. Махутов, Н. А. Прочность и безопасность. Фундаментальные и прикладные исследования / Н. А. Махутов. – Новосибирск : Наука, 2008. – 522 с. – ISBN 978-5-02-023249-5. – Текст : непосредственный.
4. Шнейдерович, Р. М. Прочность при статическом и повторно-статическом нагружении / Р. М. Шнейдерович. – Москва : Машиностроение, 1968. – 343 с. – Текст : непосредственный.
5. Серенсен, С. В. Критерии разрушения при циклическом упругопластическом деформировании / С. В. Серенсен, Р. М. Шнейдерович. – Текст : непосредственный // Прочность при малом числе циклов нагружения. – Москва : Наука, 1969. – 257 с.
6. Когаев, В. П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность / В. П. Когаев, Н. А. Махутов, А. П. Гусенков. – Москва : Машиностроение, 1985. – 113 с.
7. Махутов, Н. А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность / Н. А. Махутов. – Москва : Машиностроение, 1981. – 272 с. – Текст : непосредственный.
8. Coffin, L. F. Low-cycle fatigue : a review. Applied material research / L. F. Coffin. – 1962. – Volume 1, № 3. – P. 129–141.
9. Manson, S. S. Fatigue : a complex subject : some simple approximations / S. S. Manson // Experimental mechanics. – 1965. – № 5. – P. 193–226.
10. Аистов, А. С. Концентрация напряжений при малоцикловых нагрузках труб большого диаметра / А. С. Аистов, В. Б. Штенберг. – Текст : непосредственный // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород. – 2020. – № 1. – С. 40–47.



11. Нормы расчета на прочность элементов реакторов, парогенераторов, сосудов и трубопроводов атомных электростанций. – Москва : Металлургия, 1973. – 408 с. – Текст : непосредственный.

AISTOV Anatoliy Sergeevich, candidate of technical science, associate professor, professor of the chair of general physics and theoretical mechanics; **VEDIAIKINA Olga Ivanovna**, candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, associate professor of the chair of general physics and theoretical mechanics

EVALUATION OF THE DURABILITY OF LARGE DIAMETER PIPES BASED ON THE RESULTS OF A STUDY OF THE DEFORMATION AND STRENGTH CHARACTERISTICS OF MATERIALS WITH A SMALL NUMBER OF LOADING CYCLES

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering.

65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603952, Russia.

Tel.: +7 (831) 430-55-02; e-mail: oftm@nngasu.ru

Key words: durability, low cycle strength, welded joints, number of cycles, load, fracture.

The results of a study conducted on a number of structural materials (17GS, 14HGS and 10G2X1) and large diameter pipes (720 and 820mm.) under low-cycle loading are presented. It is established that in the range of the number of loadings $[2.10]^{2 \div 4}$, irrespective of the type of material, data on the durability of samples under heavy load form a single scatter band. A calculated curve of permissible cyclic deformations and the number of loading cycles for low-alloy tubular steels is obtained.

REFERENCES

1. Gusenkov A. P. Prochnost pri izotermicheskom i neizotermicheskom nagruzhении. [Strength under isothermal and non-isothermal loading]. Moscow, Nauka, 1979, 295 p.
2. Aistov A. S., Gusenkov A. P. Issledovanie malotsiklovoy prochnosti trub bolshogo diametra magistralnykh gazo- i nefteprovodov [Investigation of low-cycle strength of large diameter pipes of main gas and oil pipelines]. Mashinovedenie [Engineering science], 1975, № 3, P. 61–71.
3. Makhutov N. A. Prochnost i bezopasnost. Fundamentalnye i prikladnye issledovaniya [Durability and safety. Fundamental and applied research]. Novosibirsk, Nauka, 2008, 522 p.
4. Shneyderovich R. M. Prochnost pri staticheskom i povtorno-staticheskom nagruzhении [Strength under static and repeated static loading]. Moscow, Mashinostroenie, 1968, 343 p.
5. Serensen S. V., Shneyderovich R. M. Kriterii razrusheniya pri ciklicheskom uprugoplasticheskom deformirovanii [Criteria of destruction during cyclic elastoplastic deformation] Prochnost pri malom chisle ciklov nagruzheniya [Strength with a small number of loading cycles]. Moscow, Nauka, 1969, 257 p.
6. Kogaev V. P., Mahutov N. A., Gusenkov A. P. Raschety detaley mashin i konstruktsiy na prochnost i dolgovechnost [Calculations of machine parts and structures for strength and durability]. Moscow, Mashinostroenie, 1985, 113 p.
7. Makhutov N. A. Deformacionnye kriterii razrusheniya i raschet elementov konstruktsiy na prochnost [Deformation criteria of destruction and calculation of structural elements for strength]. Moscow, Mashinostroenie, 1981, 272 p.
8. Coffin L. F. Low-cycle fatigue: a review. Applied Material Research, 1962, vol. 1, № 3, P. 129–141.



9. Manson S. S. Fatigue: A Complex Subject: Some Simple Approximations // Experimental Mechanics, 1965, № 5. P.193-226.

10. Aistov A. S., Shtenberg V. B. Kонтсентратсия napryazheniy pri malociklovyykh nagruzkakh trub bolshogo diametra [Stress concentration at low cycle loads of large diameter pipes]. Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]. Nizhegorod. gos. arkhitektur.- stroit. un-t. Nizhny Novgorod, 2020, № 1, P. 40-47.

11. Normy raschyota na prochnost elementov reaktorov, parogeneratorov, sosudov i truboprovodnykh atomnykh elektrostantsiy, opytnykh i issledovatel'skikh yadernykh reaktorov i ustanovok [Norms of calculation for strength of elements of reactors, steam generators, vessels and pipelines of nuclear power plants, experimental and research nuclear reactors and installations]. Moscow, Metallurgiya, 1973, 408 p.

© **А. С. Аистов, О. И. Ведяйкина, 2025**

Получено: 07.04.2025 г.