

**УДК 621.6****УЧЕТ ДЕФОРМАЦИОННОГО СТАРЕНИЯ В РАСЧЕТАХ  
РЕСУРСА ЭЛЕМЕНТОВ ОБОРУДОВАНИЯ**

*Р.С. Зайнуллин, А.А. Александров, А.М. Галлямов, В.А. Воробьев  
(ИПТЭР),  
М.А. Галлямов (УГНТУ)*

Деформационное старение стали зависит от степени предварительной статической деформации  $\epsilon_{пл}$ , времени  $\tau_0$  и температуры  $T_c$  эксплуатации с момента реализации в металле пластической деформации  $\epsilon_{пл}$ .

Пластическая деформация  $\epsilon_{пл}$  в металле конструктивных элементов резервуаров и трубопроводов может реализоваться при их изготовлении, хранении, изготовлении, транспортировке, монтаже, ремонте и испытаниях. Кроме этого пластическая деформация может реализоваться при эксплуатации в результате особенностей протекания процессов повреждаемости металла в окрестности концентраторов напряжений в условиях малоциклового нагружения.

В условиях малоциклового нагружения резервуаров и трубопроводов, для которых характерно повторно-статическое нагружение по отнулевому циклу изменения внутреннего давления с реализацией пластических деформаций при эксплуатации в окрестностях концентраторов напряжений можно пренебрегать.

Основными источниками пластических деформаций в конструктивных элементах резервуаров и трубопроводов следует относить различные технологические операции связанные с холодным формоизменением металла: гибка и экстрадирование труб; гибка обечаек и других элементов; гидравлические испытания и др.

При холодном формоизменении металла величина пластической деформации может быть рассчитана по формуле:

$$\epsilon_{пл} = \frac{\delta}{2\rho}, \quad (1)$$

где  $\delta$  – толщина элемента,  $\rho$  – радиус кривизны элемента, изготовленного (выправленного) холодным деформированием.

Эта формула может быть использована для оценки пластических деформаций в металле элементов с гофрами и вмятинами.

Степень деформационного старения целесообразно оценивать отношением временного сопротивления стали после старения  $\sigma_B^{dc}$  к её исходному значению  $\sigma_B$ :

$$\varphi_{dc} = \frac{\sigma_B^{dc}}{\sigma_B} = 1 + \frac{\Delta\sigma_B}{\sigma_B}, \quad (2)$$

где  $\Delta\sigma_B = \sigma_B^{dc} - \sigma_B$  – прирост временного деформационного сопротивления из-за старения. В дальнейшем величину  $\Delta\sigma_B / \sigma_B$  будем обозначать буквой  $D$  с индексом «с» ( $D_c$ ):

$$\Delta\sigma_B / \sigma_B = D_c. \quad (3)$$

Установлено, что максимальное значение  $D_c^{\max}$  отмечается при  $\varepsilon_{пл} = 0,5 \cdot m$ , где  $m$  – коэффициент деформационного упрочнения. При этом величина  $D_c^{\max} \approx m$ .

Зависимость  $D_c$  от  $\varepsilon_{пл}$  в указанном интервале ( $\varepsilon_{пл} \leq 0,5 \cdot m$ ) близка с линейной:

$$D_c = 2 \cdot \varepsilon_{пл}. \quad (4)$$

Для полной реализации деформационного старения необходимо определенное время  $\tau_c$  (эксплуатации или вылеживания).

При фиксированных значениях  $\varepsilon_{пл}$  текущие значения коэффициента деформационного старения  $D$  от времени описывается степенной функцией следующего вида:

$$\frac{D}{D_c} = \bar{D} = \left( \frac{\tau}{\tau_c} \right)^{0,05} = \bar{\tau}^{0,05}, \quad (5)$$

где  $D$  – текущее значение коэффициента деформационного старения, соответствующее определенному времени старения  $\tau$ ;  $D_c$  и  $\tau_c$  – предельные значения коэффициента деформационного старения и времени старения.

Произвольное значение коэффициента деформационного старения от  $\varepsilon_{пл}$  и  $\tau$  определяется по формуле:

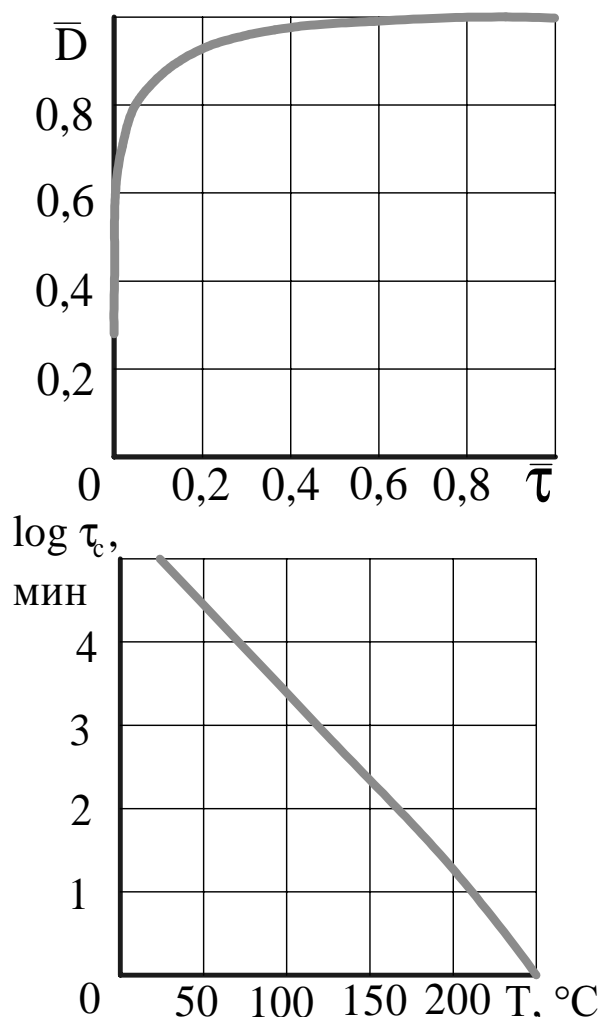
$$D = 2 \cdot \varepsilon_{пл} \left( \frac{\tau}{\tau_c} \right)^{0,05}. \quad (6)$$

Предельное значение времени старения  $\tau_c$  в зависимости от температуры эксплуатации  $T$  (вылеживания) описывается показательной функцией:

$$\tau_c = 10^{0,024(250 - T)}, \text{ мин.} \quad (7)$$

Эта формула справедлива при  $T \leq 250$  °С.

Зависимости  $\bar{D}$  от  $\bar{\tau}$  и  $\tau_0$  от  $T$  приведены на рисунках 1 и 2

Рисунок 1 – Зависимость  $\bar{D}(\bar{\tau})$ Рисунок 2 – Зависимость  $\tau_c(T)$ 

Объединяя последние два уравнения получаем уравнение, связывающее коэффициент деформационного старения  $D$  с величиной  $\varepsilon_{пл}$ ,  $\tau$  и  $T$ :

$$D = 2 \cdot \varepsilon_{пл} \cdot \tau^{0,05} \cdot \left[ 10^{0,024(T-250 \text{ } ^\circ\text{C})} \right]^{0,05}. \quad (8)$$

Расчеты по формуле (8) показывают, что при нормальных условиях эксплуатации деформационное старение завершается примерно за четыре месяца. Другими словами, во многих случаях процессы завершены ещё до начала пуска в эксплуатацию рассматриваемого объекта. Причем для большинства сосудов и трубопроводов в соответствии с нормативными документами величина допускаемой холодной деформации составляет 1,5 – 2,0 %. Этим деформациям по формуле (8) соответствуют  $D_c = 3 - 4 \%$ .

Указанный факт подтверждается многочисленными испытаниями образцов, вырезанных из труб и сосудов, в частности, выполненными в ИПТЭР<sup>1</sup> и др.

<sup>1</sup> Гумеров А.Г., Зайнуллин Р.С., Ямаев и др. Старение труб нефтепроводов. – М.: Недра, 1995. – 218 с

В случае оценки предела текучести необходимо, наряду с деформационным старением, учитывать его изменение вследствие деформационного упрочнения стали, которое оценивается по степенной зависимости:

$$\sigma_{T\varepsilon} = C \cdot \varepsilon_{\text{пл}}^m, \quad (9)$$

где  $C$  и  $m$  – константы, определяемые по таблице 1.

Степень деформационного упрочнения  $\varphi_{\text{ду}}$  на основании уравнения (9) и условного предела текучести  $\sigma_{0,5}$  будет равна:

$$\varphi_{\text{ду}} = \frac{\sigma_{T\varepsilon}}{\sigma_T} \approx \varepsilon_{\text{пл}}^m, \quad (10)$$

где  $\bar{\varepsilon}_{\text{пл}} = \varepsilon_{\text{пл}} / \varepsilon_{0,5}$ ,  $\varepsilon_{0,5} = 0,005$  – условная деформация текучести (при  $\sigma_{0,5}$ ).

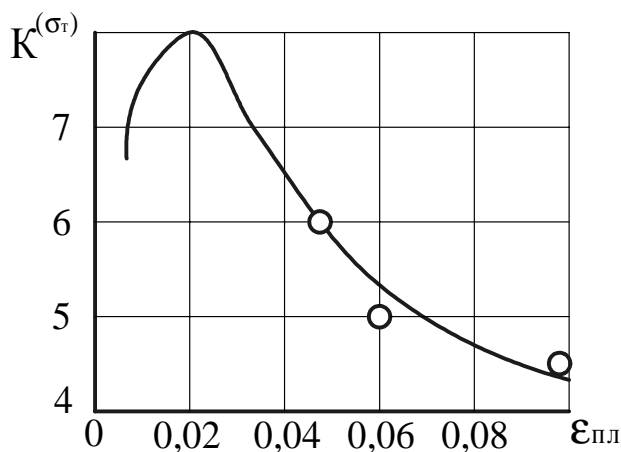


Рисунок 3 – Зависимость  $K^{(\sigma_T)}$  от  $\varepsilon_{\text{пл}}$

Общий коэффициент деформационного упрочнения и старения  $D_{\text{дус}}$  (от предварительной деформации и деформационного старения) определяются по формуле:

$$D_{\text{ус}} = D_y + D_c = (\bar{\varepsilon}_{\text{пл}}^m - 1) + 2\varepsilon_{\text{пл}}.$$

Отсюда можно показать доминирующее влияние деформационного упрочнения и деформационного старения. В интервале  $\varepsilon_{\text{пл}} \geq 0,005$  первое слагаемое этой формулы всегда

больше второй:  $K^{(\sigma_T)} = D_y / D_c > 1,0$ . В области  $\varepsilon_{\text{пл}} \geq 0,02$  коэффициент  $K$  заметно снижается (рисунок 3).

Предварительная пластическая деформация и деформационное старение стали снижают запас пластичности в прямой зависимости от  $\varepsilon_{\text{пл}}$  и  $D$ :

$$\varphi_{\text{ни}} = \frac{n_i}{n_{i0}} = 1 - \frac{\varepsilon_{\text{пл}}}{n_{i0}} - D, \quad (12)$$

где  $n_i$  и  $n_{i0}$  – текущее и исходное значение произвольной пластической характеристики стали (оптимальных изменения  $\psi$  и удлинения  $\delta_b$ ). Здесь  $D$  – определяется по формуле (8). Очевидно, что  $\varphi_{\text{ни}} \leq 1,0$ .

Предельное значение  $\varphi_{\text{ни}}$  определяется с учетом формулы (4):

$$\varphi_{\text{ни}} = 1 - \frac{\varepsilon_{\text{пл}}}{n_{i0}} - 2 \cdot \varepsilon_{\text{пл}}. \quad (13)$$

Уравнение (13) может играть существенную роль при оценке качества металла конструктивных элементов длительно эксплуатируемых резервуаров и трубопроводов, поскольку на некоторые пластические характеристики, например на относительное удлинение  $\delta$ , соответствующие нормативные документы (СНиП 2.05.06 – 85\* и др.) накладывают определенные ограничения. В частности, относительное удлинение сталей магистральных нефтегазопроводов должно составлять не менее 0,16 (16 %):  $\delta > 16 \%$ .

**Литература:**

\* Зайнуллин Р.С., Морозов Е.М. Безопасное развитие трещин в элементах оболочечных конструкций. / Под ред. А.Г. Гумерова. – СПб.: Недра, 2005. – 168 с.