

**ОСНОВЫ РАСЧЕТА
И ХАРАКТЕРИСТИКА ОПОР ТРУБОПРОВОДОВ
С ПРИМЕНЕНИЕМ МАТЕРИАЛА МР,
РАБОТАЮЩЕГО НА ИЗГИБ**

Чтобы обобщить данные по исследованию опор, работающих на изгиб, и применить их для типоразмеров опор, рассмотрим, как связаны между собой физические величины, характеризующие подобие опор. Такой подход позволяет построить обобщенные характеристики в безразмерных параметрах для данного семейства опор [1], которые могут быть применимы для расчета любого промежуточного типоразмера.

Подобные семейства опор* удобно описывать одним полем петель гистерезиса в относительных обобщенных координатах $\sigma^* - \bar{U}$

$$\sigma^* = \frac{M}{2I}, \quad \bar{U} = \frac{Uh}{l^2},$$

где M — изгибающий момент в характерном сечении элемента МР,

U — абсолютное значение деформации элемента МР,

I — момент инерции выбранного сечения,

l — длина участка МР, работающего на изгиб,

h — высота этого участка.

Рассматривая реакцию опоры как равнодействующую двух обобщенных сил, один из видов графика петли можно изобразить с помощью следующих уравнений:

$$\sigma^*(\bar{U}) = \sigma^{**}(\bar{U}) + \delta R(\sigma_a^{**}), \quad (1)$$

где $\delta = \text{sign } \dot{U} = \pm 1$.

* Подобными будем называть такие семейства опор, которые получены по одной технологии из одинакового исходного материала и во всех сходственных точках и объемах сохраняют постоянными плотность, структуру и ориентацию спиралей по отношению к собственным координатам.

Кроме того, при квазистатическом приложении внешней циклической нагрузки тождественному напряженному состоянию и деформации соответствуют одинаковые коэффициенты поглощения Ψ и условный эффективный модуль упругости

$$E^* = \frac{Cl^3}{2IE_0},$$

где $C = \frac{F_a}{\rho}$ — средняя жесткость цикла,

E_0 — модуль упругости исходного материала проволоки,

F_a — амплитуда силы,

ρ — амплитуда деформации.

Первая сила обращается в нуль только в положении равновесия опоры, принимает максимальные значения в крайних ее положениях и всегда направлена так, чтобы восстановить нарушенное положение равновесия. Это — обобщенная сила упругого сопротивления. Вторая, направленная в сторону, противоположную направлению перемещения опоры, — обобщенная сила неупругого сопротивления.

Заметив, что графиком обобщенной силы упругого сопротивления является геометрическое место середин вертикальных отрезков, заключенных между восходящей и нисходящей ветвями петли, примем ее в виде

$$\sigma^{**}(\bar{U}) = \frac{c_1 \bar{U}}{(1 - c_2 |\bar{U}|)^3}; \quad (2)$$

$$0 \leq |\bar{U}| < \bar{\rho}; \quad c_1 > 0; \quad c_2 > 0; \quad \bar{U}_{\max} \leq \frac{1}{c_2},$$

где c_1, c_2 — постоянные для данного семейства опор;

$\bar{\rho} = \frac{\rho h}{l^2}$ — относительная амплитуда деформации.

Обобщенная сила неупругого сопротивления может быть линейной функцией

$$-R(\sigma_a^{**}) = (\sigma_a^{**} + \sigma_0^*) f, \quad (3)$$

где f — постоянный коэффициент, учитывающий истинный коэффициент трения между витками спирали;

δ_0^* — условная обобщенная сила трения при $\bar{U} = 0$
 $\delta_a^{**} = 0$.

Согласно (2) и (3) условное эффективное напряжение в опасном сечении элемента МР, работающего на изгиб, выразится следующим равенством:

$$\sigma^*(\bar{U}) = \frac{c_1 \bar{U}}{(1 - c_2 |\bar{U}|)^3} + \delta f (\sigma_a^{**} + \sigma_0^*). \quad (4)$$

Прямую, соединяющую точки пересечения восходящей и нисходящей ветвей петли, будем называть главным диаметром петли. Тангенс угла наклона главного диаметра определит условный эффективный модуль упругости

$$E^* = \frac{\sigma_a^*}{\bar{\rho}} = \frac{c_1 (1 + f)}{(1 - c_2 \bar{\rho})^3} + \frac{f \sigma_0^*}{\bar{\rho}}. \quad (5)$$

Эффективная жесткость опоры равна

$$C(\bar{\rho}) = \frac{2I \sigma_a^*}{l \rho m_1} = \frac{2E^* I}{l^3}. \quad (6)$$

Для консольной схемы опоры с силой, приложенной на конце пролета, $m_1 = 1$.

Для шарнирноопертой схемы с силой, приложенной посередине пролета, $m_1 = 1/4$.

Запишем величину относительной амплитуды силы

$$\eta = \frac{\sigma_a^*}{R(\sigma_a^{**})} = \frac{\sigma_a^{**}}{(\sigma_a^{**} + \sigma_0^*)} + 1. \quad (7)$$

Из условия

$$\int_0^{\bar{\rho}} \sigma_1^*(U) d\bar{U} - \int_0^{\bar{\rho}} \sigma_2^*(U) dU = 2\psi \bar{W} m_2,$$

где для прямоугольного сечения элемента $m_2 = 6$, можно найти простое выражение для коэффициента поглощения

$$\Psi = \frac{8}{\eta}.$$

Анализ процесса циклического деформирования опор внешними силами показывает, что при выбранной форме петли гистерезиса рассеивания энергии может не быть, если $\sigma^*(\bar{U}) \leq \leq f\sigma_a^*$. Однако, как показывает опыт, наличие плавного перехода на конечных участках восходящей и нисходящей ветвей действительных петель гистерезиса обеспечивает некоторое

рассеяние энергии даже при несоблюдении последнего неравенства. Поэтому в зонах с малыми η растет разница между экспериментальными и вычисленными значениями Ψ и E^* . В настоящей работе нет необходимости рассматривать зоны с малыми η и вводить соответствующие поправки, так как рабочий режим определяется диапазоном $\eta = 1,5 \div 5$. Таким образом, полученные критерии Ψ и F^* и их зависимости от относительных амплитуд сил позволяют производить все необходимые расчеты по определению упругих и демпфирующих свойств опор, связанные с оптимальным демпфированием систем трубо-

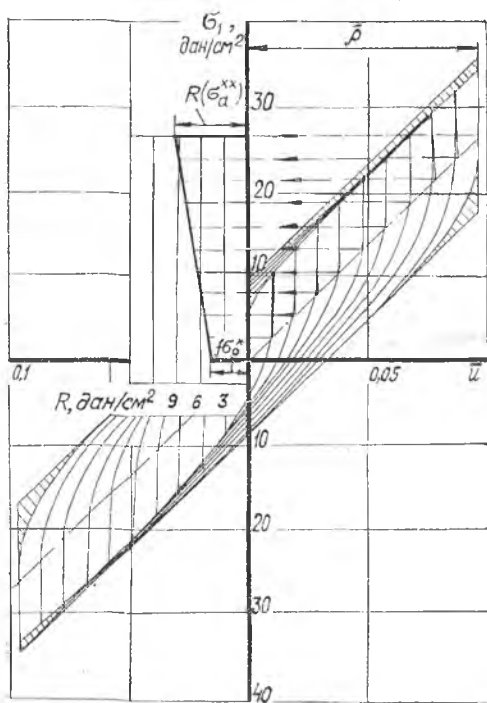


Рис. 1. Поле петель гистерезиса

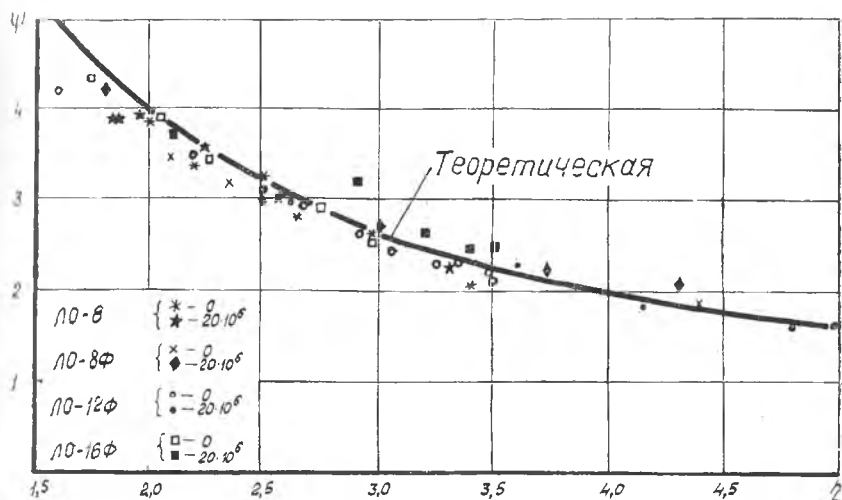


Рис. 2. Зависимость $\Psi = \Psi(\eta)$ для опор типа ЛО при наработке в 0 и 20 млн. циклов

проводов. Рассмотренная модель расчета, хотя и приближенна, позволяет исследовать многие свойства, присущие целому классу опор и увязать между собой их абсолютные размеры.

На рис. 1 показано экспериментальное поле петель гистерезиса унифицированного ряда семейства ленточных опор. Из рисунка видно, что основные особенности предложенной формы петли гистерезиса подтверждаются. Обобщенная сила неупругого сопротивления R (σ_n^{**}) подчиняется линейному закону. В результате обработки статических петель гистерезиса по формулам (2) — (4) были получены следующие значения констант для этих опор:

$$f = 0,15; \quad c_1 = 2,77 \frac{\text{дан}}{\text{мм}^2}; \quad c_2 = 0; \quad \sigma_0^* = 0,334 \frac{\text{дан}}{\text{мм}^2}.$$

Исследование стабильности производилось при постоянной амплитуде силы, в зависимости от числа циклов знакопеременного нагружения. Результаты исследования показали, что петли гистерезиса до и после знакопеременного нагружения выглядят одинаково, сохраняя свои специфические особенности.

Например, для рассматриваемых опор после наработки в 10 млн. циклов величины констант приняли следующие значения: $f = 0,18; C_1 = 1,03 \frac{\text{дан}}{\text{мм}^2}; C_2 = 0; \sigma_0^* = 0,13 \frac{\text{дан}}{\text{мм}^2}.$

На рис. 2 показан график зависимости $\Psi = \psi(\eta)$. Из рисунка видно, что экспериментальные точки довольно хорошо совпадают с теоретической зависимостью унифицированного ряда

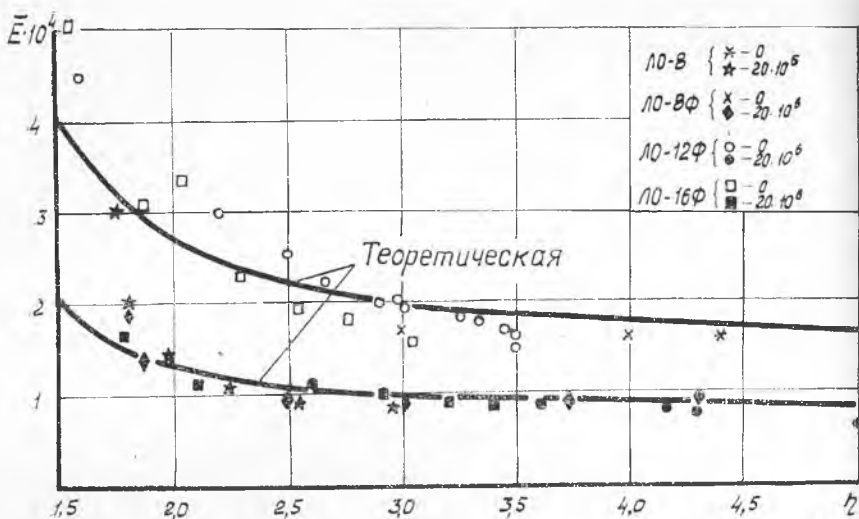


Рис. 3. Зависимость $E = E(\eta)$ для опор типа ЛО при парботке в 0 и 20 млн. циклов

семейства ленточных опор для трубопроводов с наружными диаметрами 8, 12, 16 мм. Условное обозначение этих опор, соответственно, ЛО-8, ЛО-8Ф, ЛО-12Ф, ЛО-16Ф. Буква Ф обозначает наличие фторопласта, впрессованного в рабочую поверхность ленты с целью предотвращения возможного износа трубы.

Обобщенная характеристика, оценивающая упругие свойства опор типа ЛО, согласно (5) и (7), может быть выражена таким образом:

$$\bar{E}^* = \frac{c_1 \eta}{E_0(\eta - 1)}, \quad (8)$$

где \bar{E}^* — относительный эффективный модуль упругости;

\bar{E}_0 — модуль упругости исходной проволоки.

На рис. 3 представлены предельные характеристики указанных выше опор. Опоры следует рассматривать как нелинейные с мягкой характеристикой. Экспериментальные исследования подтверждают результаты расчетной методики.

В процессе длительного циклического нагружения предельному изменению формы петли гистерезиса соответствуют определенные изменения ее основных безразмерных параметров. Анализ результатов исследования опор на стабильность показывает, что наибольшие предельные изменения параметров опор таковы:

- ψ снижается на 30%.
- E^* снижается на 55%.

Период стабилизации ограничивается примерно 10 млн. циклов.

Для обеспечения заданных механических свойств МР иногда подвергают так называемой термической стабилизации, заключающейся в предварительном нагреве заготовки и последующем ее прессовании. Температура нагрева должна быть не меньше температуры рекристаллизационного отпуска ($300 \div 550^\circ\text{C}$), но не выше рабочей. Задачей термической стабилизации является получение необходимых механических свойств пружинного материала с сохранением определенного запаса пластичности и снятие наклепа в поверхностном слое проволоки. Исследование термически стабилизированных образцов показало, что их упругие и демпфирующие свойства несколько отличаются от свойств образцов, не прошедших термической стабилизации. Прежде всего это относится к изменению коэффициента трения в местах контакта проволочных пар, который \bar{R} растет при появлении слоя окалины. Обобщенная сила трения \bar{R} увеличивает свое значение до 30%, эффективный модуль упругости \bar{E}^* уменьшает значение до 20%. Эту особенность термически стабилизированных опор необходимо учитывать в расчетах при выборе оптимальных характеристик.

Исследование других типов опор из материала МР, работающего на изгиб, в частности, колодочных опор, полностью подтвердило основные выводы, полученные при изучении опор типа ЛО.

ЛИТЕРАТУРА

1. Панин Е. А., Мальтеев М. А. Опоры трубопроводов с применением материала МР, работающего на изгиб. См. настоящий сборник.

А. Ф. Жирнов, Е. А. Панин

ИССЛЕДОВАНИЯ УПРУГО-ДЕМПФИРУЮЩИХ ОПОР ТРУБОПРОВОДОВ С ПРОКЛАДКАМИ ИЗ МАТЕРИАЛА МР

Опоры трубопроводов представляют собой часть силовой схемы пневмогидравлических магистралей и являются несущими элементами, воспринимающими все виды нагрузок. Они предназначены для обеспечения необходимой статической и динамической прочности систем трубопроводов, гарантирующей надежность их работы и нормальное функционирование.

Практика показала, что условия работы оказывают существенное влияние на сохранение работоспособности опор и, в частности, на стабильность их упругих и демпфирующих характеристик.

В настоящее время широкое применение нашли фрезерованные колодочные жесткие опоры. Конструкции таких опор могут быть подвесными для группового и опорными для одиночного крепления труб.