

**ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ  
НА МОДЕЛЯХ МАНОМЕТРИЧЕСКИХ ПРУЖИН**

Г. И. ТЫЖНОВ, В. В. ИНЖЕВИТОВ

(Представлено научным семинаром кафедры сопротивления материалов)

1. К манометрическим упругим элементам — трубчатым пружинам — предъявляются жесткие требования. Во всех случаях желательно иметь пружину, обладающую требуемой чувствительностью (податливостью) и наибольшей прочностью. Эти требования противоположны. Чувствительность пружины, например, повышается с утонением стенки, однако напряжения возрастают и прочность пружины уменьшается. Одновременно будет наблюдаться увеличение ползучести и гистерезиса. Наоборот, при стремлении увеличить прочность пружины мы сталкиваемся с необходимостью снижения ее чувствительности. Для того, чтобы не снижать чувствительность пружин и обеспечить достаточную прочность, их начинают делать из специальных сплавов, которые обладают лучшими упругими свойствами, чем латунь Л-62, из которой изготавливается в настоящее время большинство пружин.

Таким образом, главные характеристики пружины — чувствительность, прочность, ползучесть — зависят только от ее геометрических размеров и свойств материала.

Основные теоретические исследования [1, 2] посвящены, главным образом, изучению перемещений конца пружины, причем полученные формулы хорошо подтверждаются опытами, в постановке которых не встречается никаких затруднений. Задача, связанная с изучением напряжений в манометрических пружинах, более трудная и приближенное решение, полученное недавно Л. Е. Андреевой [3], нуждается в проверке.

В настоящее время создается такое положение, при котором дальнейшее развитие теории напряженного состояния манометрических пружин тормозится полным отсутствием опытных данных [3]. Частично это можно объяснить тем, что пружины имеют весьма малые размеры и поэтому экспериментальное определение напряжений связано с известными трудностями.

Пружины изготавливаются, в основном, трех форм сечений: эллиптического, плоскоовального и сегментообразного.

Целью настоящей работы явилось сравнительное изучение деформаций и напряжений манометрических пружин двух форм сечений, применяемых в настоящее время, — плоскоовальной и сегментообразной. Исследования проводились на пружинах одинакового номинального давления  $25 \text{ кг/см}^2$ . Размеры пружины плоскоовального сечения: боль-

шая ось  $2a = 19,6$  мм; малая ось  $2b = 3,34$  мм, толщина стенки  $h = 1,2$  мм; радиус центральной оси  $R = 53$  мм. Размеры пружины сегментообразного сечения:  $2a = 19,7$  мм;  $2b = 3,6$  мм;  $h = 1,2$  мм;  $R = 53$  мм (рис. 3, 4).

Напряжения изучались несколькими способами.

2. Для выявления траекторий главных напряжений мы применили метод хрупких лаковых покрытий [4]. Рекомендуемый в качестве растворителя сероуглерод ядовит, поэтому мы лак растворяли в серном эфире. Очищенные поверхности пружин несколько раз покрывались лаком при помощи мягкой кисти, с подсушкой каждого слоя. Окончательная сушка производилась в термостате в течение двух часов при  $70^\circ$ . Затем обе пружины одновременно нагружались плавно нарастающим давлением. В местах наибольших растягивающих напряжений лак растрескивается. Чувствительность лака в ходе опыта уменьшается [5, 6]. Поэтому мы не определяли величину напряжений этим методом, а ограничились только выявлением траекторий главных напряжений. На фотографии просматривается и влияние заделки конца на направление главных напряжений (рис. 1). Отбросив запаянную часть пружины, т. е. на которую трещины



Рис. 1.

не распространились, мы увидим, что влияние концевго эффекта (искривление трещин) распространилось на длину, не превышающую третью часть ширины пружины. Полученные данные в дальнейшем использовались при изготовлении моделей и наклейке датчиков.

3. Для исследования ответственных деталей машин и сооружений все чаще применяются тензометрические модели [6, 7]. Модель выполняется с соблюдением линейного масштаба из материала, обладающего низким модулем упругости. Нагрузка на модель должна имитировать действительную. На моделях измеряются деформации и напряжения. Пересчет данных испытания модели на деталь выполняется по формулам теории моделирования.

Обычно модели изготавливаются с уменьшением. В данном случае, наоборот, модели были сделаны в увеличенном масштабе 10 : 1.

Модели обеих пружин делались из органического стекла путем склеивания отдельных секций, которым предварительно придавалась клиновья форма для получения двойной кривизны. Методы изготовления моделей достаточно подробно описаны в литературе.

Для облегчения изготовления моделей мы их сделали в виде коротких отрезков (длина, примерно, равна ширине), а открытые концы заглушили специальными резиновыми манжетами, которые не сдерживали деформацию концевых сечений. Манжеты связывались между собой сквозными болтами, которые воспринимали всю продольную нагрузку, создаваемую давлением, освобождая тем самым от нее модели. Таким образом, продольные напряжения  $\sigma_1$ , замеренные на таких моделях, будут отличаться от действительных. Однако, как показывают расчеты, эта ошибка невелика и в данном случае ею можно пренебречь.

Перед окончательной сборкой моделей на внутреннюю поверхность наклеивались датчики, а парные им компенсационные датчики наклеивались на отдельные пластинки из оргстекла, которые затем закладывались внутрь моделей. На наружную поверхность датчики приклеивались после сборки моделей.

Для крепления проводов, у мест соединения с выводами датчиков, мы их приклеивали к модели клеем БФ-2. Такое крепление оказалось простым и надежным.

Модели нагружались воздухом давлением 400 мм рт. ст. Величина давления выбиралась так, чтобы деформации были достаточны для измерений, а напряжения не превышали бы предела пропорциональности оргстекла.

Опыты показали надежность как моделей, так и манжетных уплотнений. Вид моделей и пружин показан на рис. 2.

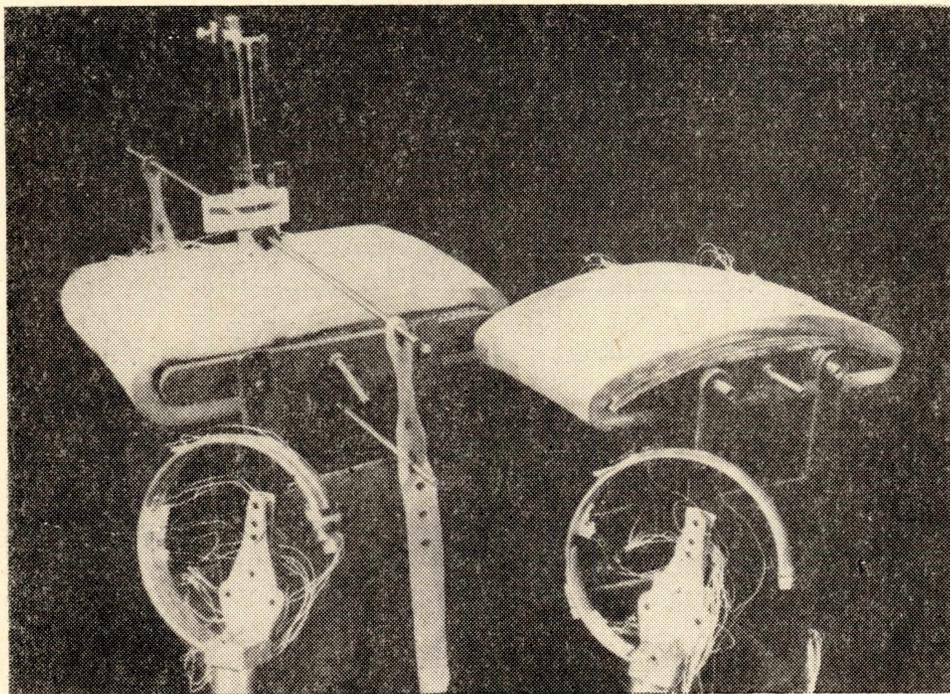


Рис. 2.

4. Напряжения на внутренней поверхности моделей измерялись только тензодатчиками с базой 5 мм, а на наружной поверхности и датчиками и рычажными тензометрами. Это повысило надежность измерений и дало возможность критически оценить полученные результаты.

Точки, в которых производились измерения, отмечены цифрами на рис. 3 и 4. В каждой точке деформации измерялись в двух направлениях, соответствующих направлению главных напряжений. Для электротензометрирования мы применили сорокаточечный прибор ВСТ-3. Напряжение питания при измерениях на оргстекле равно 1,5 в, а при измерениях на металлах — 6 в. Это вызвано тем, что оргстекло имеет низкую теплопроводность, в результате чего датчики на нем нагреваются больше, чем на металлах.

## Эюры напряжений

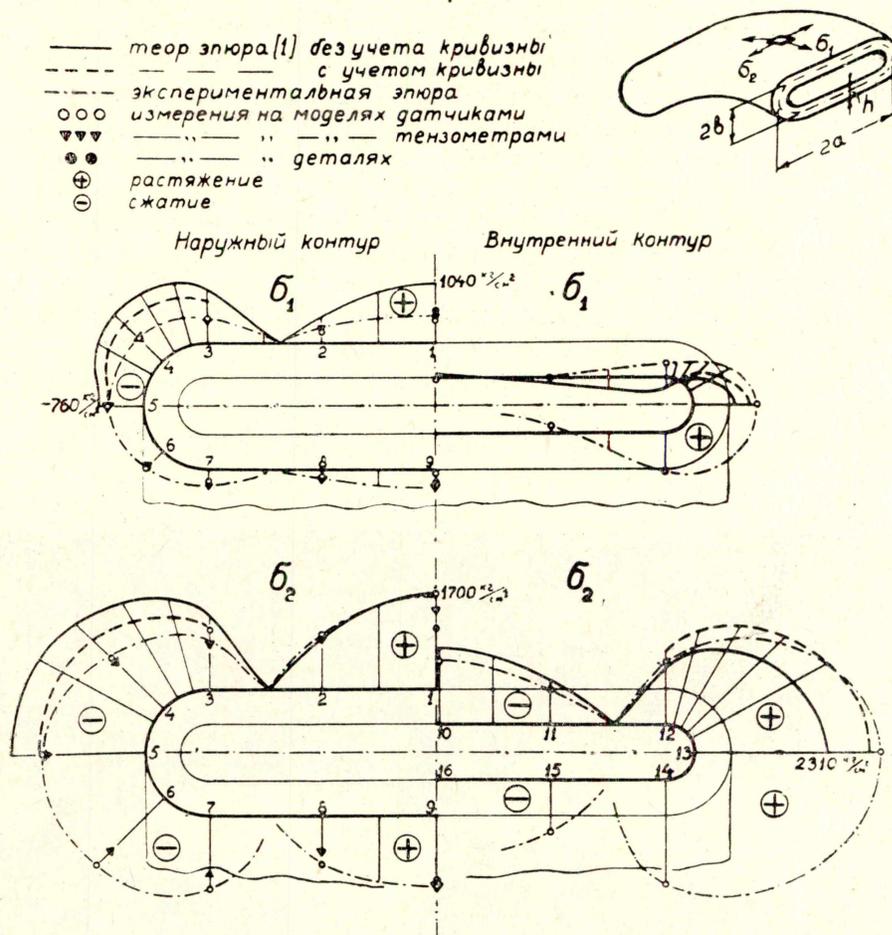


Рис. 3.

Известно, что короткобазные датчики весьма чувствительны к поперечным деформациям, поэтому при вычислении деформаций мы использовали формулы, которые учитывают это обстоятельство [8]

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{C}{S(1-B)} (n_1 - Bn_2) \\ \varepsilon_2 &= \frac{C}{S(1-B)} (n_2 - Bn_1) \end{aligned} \right\}, \dots \quad (1)$$

где постоянная прибора  $C = 1,1 \cdot 10^{-5}$ , тензочувствительность проволоки  $S = 2$ , а  $n_1$  и  $n_2$  — числа делений шкалы прибора для двух датчиков, наклеенных в данной точке.

### Геометрическая постоянная решетки датчика

$$B = \frac{1}{\frac{2l}{\pi r} + 1} = 0,045,$$

где длина продольных участков датчика  $l = 4,98$  мм, а радиус петель  $r = 0,15$  мм.

При пользовании формулами (1) необходимость в тарировке датчиков отпадает.

Главные напряжения вычислялись по обычным формулам

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{E}{1 - \nu^2} (\varepsilon_1 + \nu \varepsilon_2), \\ \sigma_2 &= \frac{E}{1 - \nu^2} (\varepsilon_2 + \nu \varepsilon_1). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Модуль упругости оргстекла, определенный опытным путем,  $E = 30000$  кг/см<sup>2</sup>; коэффициент Пуассона  $\nu = 0,35$  был принят по справочнику [4].

5. Вычисленные по формулам (2) напряжения для модели нужно пересчитать на деталь, используя зависимость, отражающую подобие модели и детали [7]

$$\sigma_{\text{дет}} = \beta \sigma_{\text{мод}},$$

где масштаб силового подобия  $\beta = q_{\text{дет.}} : q_{\text{мод.}}$ .

Величина давления воздуха в модели, равная 400 мм рт. ст., соответствует давлению 0,544 кг/см<sup>2</sup>. Номинальное давление для обеих пружин равно 25 кг/см<sup>2</sup>, следовательно,

$$\sigma_{\text{дет.}} = \frac{25}{0,544} \sigma_{\text{мод.}} = 46 \sigma_{\text{мод.}}$$

Результаты измерений на моделях, пересчитанные на детали, показаны на рис. 3 и 4.

6. Напряжения измерялись и непосредственно на пружинах. Однако размеры их малы и поэтому для измерений нужно применять датчики с возможно меньшей базой, порядка 1 мм. Из-за отсутствия таких датчиков нам пришлось ограничиться определением напряжений лишь в двух точках, градиент напряжений в которых является минимальным: в точках 1 и 9 плоскооальной пружины и в точках 11 и 15 — сегментобразной (рис. 3, 4). Деформации в этих точках измерялись специально изготовленными датчиками с базой 3 мм. Для их изготовления мы использовали имеющиеся датчики с базой 5 мм, у которых концы отогнули вверх. Такие датчики совершенно нечувствительны к поперечным деформациям. Для измерения напряжений (в продольном направлении) использовались обычные датчики с базой 30 мм.

Датчики тарировались на балке равного сопротивления. Деформации в местах наклейки датчиков на балке измерялись непосредственно рычажным тензодометром. Как показали опыты, погрешность измерений датчиками с базой 3 мм оказалась равной 7%, а с базой 30 мм не более 0,5%. Исходя из этого, в указанных точках пружин наклеивалось по три датчика базой 3 мм в поперечном направлении и по одному датчику базой 30 мм — в продольном. Напряжения измерялись при давлении 25 кг/см<sup>2</sup>. Результаты измерений отмечены на рис. 3 и 4.

На рис. 3 сплошными линиями показаны эпюры напряжений для пружины плоскооальной сечения, рассчитанные по формулам

Л. Е. Андреевой [3], без учета кривизны, а штриховыми линиями — с учетом кривизны.

На рис. 4 показаны экспериментальные эпюры напряжений для трубки сегментообразного сечения. Квадратами отмечены точки, в которых напряжения получены с помощью поляризационно-оптического метода (см. статью в данном сборнике).

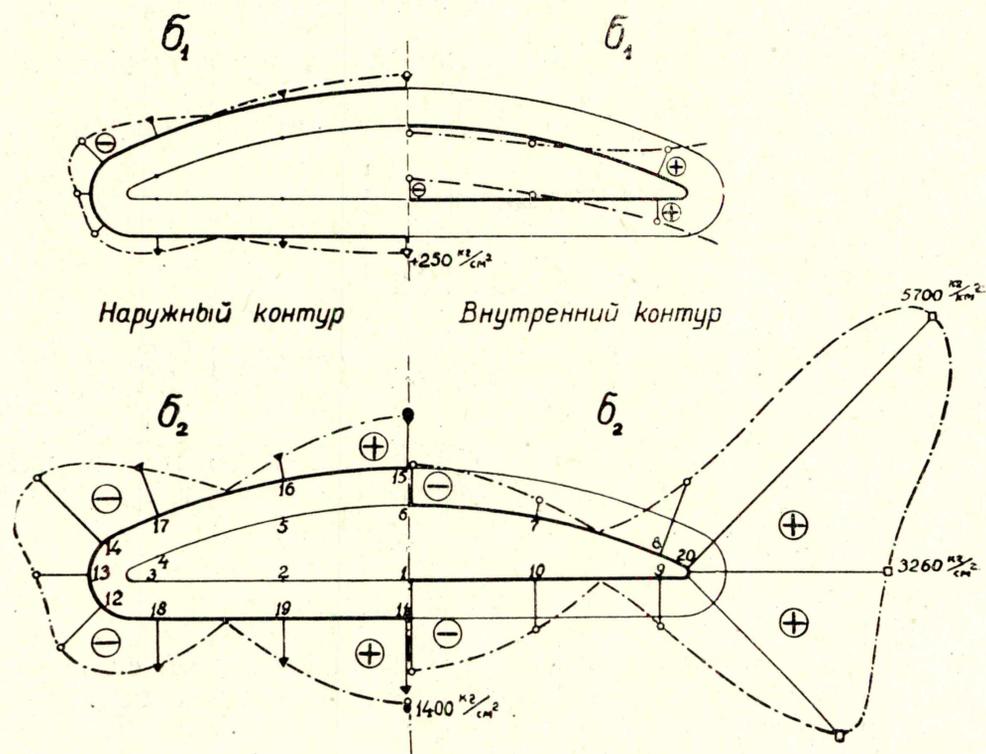


Рис. 4.

7. Как известно, ход конца трубчатой пружины зависит от величины относительной деформации сечения (раздутия), т. е. от отношения  $\Delta b : b$ , где  $b$  — размер малой полуоси сечения, а  $\Delta b$  — ее изменение. Эти деформации измеряются с помощью обычного индикатора часового типа в нескольких местах среднего сечения модели. Результаты измерений приведены в табл. 1; номера точек измерений согласованы с рис. 3 и 4.

Поскольку величина относительной деформации сечения является переменной, то можно сделать предположение о том, что ход конца пружины определяется ее средней величиной. В табл. 1 приведены соответствующие данные о величине относительной деформации.

Таблица 1

Место измерения	Плоскоовальное сечение			Сегментообразное сечение		
	1—9	2—8	3—7	11—15	16—19	17—18
$\Delta b$ мм	0,76	0,62	0,11	0,61	0,45	0,14
$b$ мм	34	34	34	36	32	21
$\Delta b : b$	0,022	0,018	0,003	0,017	0,014	0,007
Средняя величина $\Delta b : b$	0,0128			0,0116		

Средняя величина относительной деформации получена путем планиметрирования площади изменения  $\Delta v : v$  по ширине пружины. У исследуемых пружин плоскоовального и сегментообразного сечения величина хода конца при давлении  $25 \text{ кг/см}^2$  составляет соответственно  $5,8 \text{ мм}$  и  $5,2 \text{ мм}$ . Отношение их равно —  $5,8 : 5,2 = 1,11$ , а отношение средних величин относительных деформаций, согласно табл. 1, будет  $0,0128 : 0,0116 = 1,10$ . Поскольку разница между отношениями меньше  $1\%$ , постольку предположение о том, что ход конца пружины определяется средней величиной относительной деформации сечения, по крайней мере на данных пружинах, подтверждается.

### Выводы

1. Разработана методика экспериментального определения напряжений на моделях манометрических трубчатых пружин, которая проверена на 2 формах сечений: плоскоовальном и сегментообразном. Результаты измерений на моделях и деталях согласуются хорошо. В большинстве точек результаты измерений на моделях с помощью тензометров дают заниженные значения по сравнению с датчиками. Это следует отнести за счет того, что размер базы у них больше, чем у датчиков. Недостатком опыта явился случайный обрыв одного из датчиков в точке 16 модели плоскоовального сечения; о величине напряжений в этой точке можно судить лишь ориентировочно.

Метод тензометрических моделей следует признать весьма перспективным при изучении напряжений в маленьких деталях, для которых обычные методы измерений неприменимы.

2. Метод лаковых покрытий позволяет простыми средствами получать картины распределения главных напряжений. К сожалению, покрытия рекомендуемых составов не обладают стабильными свойствами: это затрудняет исследования и часто может обесценить полученные результаты.

3. Из сравнения теоретических [3] и экспериментальных кривых для плоскоовальной пружины видно, что и качественное и количественное совпадение напряжений  $\sigma_2$  получилось удовлетворительное. Если в формулы ввести поправку на кривизну, то совпадение значительно улучшается, особенно в опасных точках по концам большой оси. Соответствие напряжений  $\sigma_1$  значительно хуже, что может быть объяснено двумя причинами. Во-первых, точность измерения малых напряжений значительно снижается, и, во-вторых, нужно принять во внимание, что величина напряжений  $\sigma_1$  измерена на модели, которая по отношению к этим напряжениям неполностью воспроизводит условия работы детали.

4. Опыты показали, что наибольшим из главных напряжений является  $\sigma_2$ . Напряжение  $\sigma_1$  является «пассивным» и его приближенно можно принять равным  $\sigma_1 \approx \mu \sigma_2$ . Это обстоятельство позволяет сделать вывод о том, что предварительные исследования можно проводить на плоских моделях сечений.

5. На моделях хорошо изучаются и деформации сечений. Если предположение о том, что величина хода конца пружины зависит от средней относительной деформации сечения, подтвердится в дальнейшем и для пружин других давлений, то это позволит создать более простую теорию манометрических пружин, по сравнению с существующими.

6. При сравнительной оценке пружин по напряжениям лучшей следует признать пружину плоскоовального сечения, так как она имеет более благоприятное распределение напряжений по сравнению с пружиной сегментообразного сечения. Нет сомнения в том, что в местах наи-

большей кривизны у сегментообразной пружины возникает пластичный шарнир. Это подтверждается и практикой: пружины плоскоовального сечения, при прочих равных условиях, дают меньшую остаточную деформацию (растяжку), чем пружины сегментообразного сечения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Феодосьев. Упругие элементы точного приборостроения. Оборонгиз, 1949.
  2. W. Wuest. Theorie der Hochdruckröhrenfeder. Ingenieur — Archiv XXIV B, 1956.
  3. Л. Е. Андреева. Упругие элементы приборов. Машгиз, 1962.
  4. Справочник машиностроителя, т. 3, Машгиз, 1956.
  5. Г. И. Тыжнов. К вопросу определения напряжений методом хрупких покрытий. Заводская лаборатория, № 4, 1960.
  6. Напряжения и деформации в деталях и узлах машин. Сб. под ред. Н. И. Пригоровского, Машгиз, 1961.
  7. Н. И. Пригоровский, А. К. Прейсс. Исследование напряжений и жесткости деталей машин на тензометрических моделях. Изд. АН СССР, Москва, 1958.
  8. Измерение напряжений и усилий в деталях машин, под ред. Н. И. Пригоровского, Машгиз, 1955.
-