ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА им. С. М. КИРОВА

Том 228 1974.

ВЫБОР ДОПУСКОВ НА ИЗГОТОВЛЕНИЕ МАНОМЕТРИЧЕСКИХ ПРУЖИН

В. Г. АФОНИН, М. П. ШУМСКИЙ

(Представлена научно-техническим семинаром кафедры гироскопических приборов и устройств)

Общая форма зависимости между допусками на геометрические параметры пружины с отклонениями характеристик пружины от номинальных значений может быть взята из теории погрешностей приборов [1]. Если между показанием прибора y, измеряемой величиной x и параметрами l_0, m_0, ... q_0 существует зависимость

$$y=f(x,\ l,\ m,\dots q),$$

то малым приращением параметров Δl, Δm, ... Δq будет соответствовать приращение величины y

$$\Delta y=\frac{\partial f}{\partial l}\cdot\Delta l+\frac{\partial f}{\partial m}\Delta m+\dots+\frac{\partial f}{\partial q}\Delta q.$$

Это уравнение может быть использовано для установления обоснованной системы допусков на геометрические и механические параметры пружины, если известна конкретная форма зависимости $y=f(x,\ l,\ m,$ ... $q)$ между основными характеристиками пружины и ее геометрическими и механическими параметрами.

Так, например, полученная В. И. Феодосьевым [3] формула для определения относительного угла разгиба тонкостенных пружин эллиптического сечения

$$\frac{\Delta\gamma}{\gamma}=p\,\frac{1-\mu^2}{E}\,\frac{R_0^2}{BH}\left(1-\frac{B^2}{A^2}\right)\cdot\frac{\alpha\left(\frac{B}{A}\right)}{\beta\left(\frac{B}{A}\right)+\frac{R_0^2A^2}{A^4}} \qquad (1)$$

может быть использована, чтобы установить связь между допусками на геометрические параметры A, B, H, R_0 и максимальным возможным отклонением величины относительного угла разгиба от его значения, соответствующего номинальным значениям геометрических параметров.

Здесь A, B — большая и малая полуоси средней линии поперечного сечения пружины;

H — толщина стенки пружины;

R_0 — радиус оси канала пружины.

Однако поскольку формула (1) справедлива лишь для пружин с сечением эллиптической формы, она может быть использована для анализа только такого сочетания отклонений геометрических параметров, при котором снова получается сечение эллиптической формы. Так, при заданных отклонениях размеров полуосей эллипса ΔA и ΔB формулой (1) можно воспользоваться лишь в случае, если отклонение радиуса на концах большой оси удовлетворяет уравнению

$$R_1+\Delta R_1=\frac{(B+\Delta B)^2}{A+\Delta A}. \tag{2}$$

Между тем, отклонение ΔR_1 зависит от случайных причин и не подчиняется уравнению (2). Формулы для расчета пружин с овальным, плоскоовальным и восьмеркообразным сечением, полученные в работе [2], могут быть использованы для установления зависимости между отклонениями геометрических параметров и соответствующими им изменениями величин: относительного угла $\frac{\Delta\gamma}{\gamma}$ разгиба пружины, расчетного напряжения $\sigma_{экв}$, тягового момента $M_т$ и изменения объема полости ΔV. При этом может быть оценено влияние на характеристики пружины отклонений величин A, B, R, H, R_0, модуля упругости E и коэффициента Пуассона μ. Поскольку при выводе формул предполагалось, что сечение симметрично относительно двух осей, могут быть оценены только такие отклонения размеров, которые не нарушают симметрии сечения. Так, полученные формулы не позволяют исследовать случай, когда радиусы R_1 на концах большой оси сечения не совпадают по величине. Не может быть исследовано влияние технологической разностенности и несовпадения радиусов R_2 на наружной и внутренней сторонах сечения.

Исследуем связь допусков на параметры пружины с изменением перемещения конца пружин с малой постоянной толщиной стенки.

Зависимость перемещения конца пружины от ее параметров определяется формулой

$$\lambda=p\cdot\Gamma(\gamma)\frac{A\cdot r_0}{Eh_0}\,\frac{C_1(b_1 r_1)}{\dfrac{h^2}{12(1-\mu^2)}+\dfrac{C(b_1 r_1)}{r_0^2}}.$$

Здесь λ — перемещение конца пружины;

$\Gamma(\gamma)$ — коэффициент, зависящий от величины центрального угла активной части и от конструктивного оформления конца пружины (рис. 1);

b, r, h, r_0 — безразмерные отношения соответствующих размеров к длине большой полуоси сечения.

Найдем относительное изменение перемещения конца пружины, соответствующее заданным отклонениям параметров

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda}=\frac{1}{\lambda}\left\{\frac{\partial\lambda}{\partial A}\cdot\Delta A+\frac{\partial\lambda}{\partial\Gamma}\cdot\frac{d\Gamma}{d\gamma}\cdot\Delta\gamma+\frac{\partial\lambda}{\partial r_0}\cdot\Delta r_0+\frac{\partial\lambda}{\partial h}\cdot\Delta h+\right.$$
$$+\frac{\partial\lambda}{\partial C_1}\left[\frac{\partial C_1}{\partial b}\cdot\Delta b+\frac{\partial C_1}{\partial r_1}\cdot\Delta r\right]+\frac{\partial\lambda}{\partial C}\cdot\left[\frac{\partial C}{\partial b}\cdot\Delta b+\frac{\partial C}{\partial r_1}\cdot\Delta r_1\right]+$$
$$\left.+\frac{\partial\lambda}{\partial E}\cdot\Delta E+\frac{\partial\lambda}{\partial\mu}\cdot\Delta\mu\right\}=\alpha_A\cdot\frac{\Delta A}{A}+\alpha_B\cdot\frac{\Delta b}{b}+\alpha_r\cdot\frac{\Delta r}{r}+$$
$$+\alpha_h\cdot\frac{\Delta h}{h}+\alpha_{r_0}\cdot\frac{\Delta r_0}{r_0}+\alpha_\gamma\frac{\Delta\gamma}{\gamma}+\alpha_E\frac{\Delta E}{E}+\alpha_\mu\frac{\Delta\mu}{\mu}. \tag{3}$$

Здесь

$$\left.\begin{aligned}
&\alpha_A=1;\ \alpha_B=b\left[\frac{\frac{\partial C_1}{\partial b}}{C}-\frac{\frac{\partial C}{\partial b}}{\nu+C}\right],\ \text{где}\ \nu=\frac{r_0^2h^2}{12(1-\mu^2)},\\
&\alpha_{r_1}=r_1\left[\frac{\frac{\partial C_1}{\partial r_1}}{C_1}-\frac{\frac{\partial C}{\partial n}}{\nu+C}\right],\ \alpha_h=-\left[1+\frac{2}{1+\frac{C}{\nu}}\right],\ \alpha_{r_0}=1-\frac{2C}{\nu+C},\\
&\alpha_\gamma=\frac{\gamma}{\Gamma}\cdot\frac{d\Gamma}{d\gamma},\ \alpha_E=-1,\ \alpha_\mu=-\frac{2}{1+\frac{C}{\nu}}\frac{\mu^2}{1-\mu^2}
\end{aligned}\right\}. \tag{4}$$

ΔA, Δb, $(\Delta\gamma)$, Δr_0, Δh, Δr, ΔE, $\Delta\mu$ — заданные отклонения параметров.

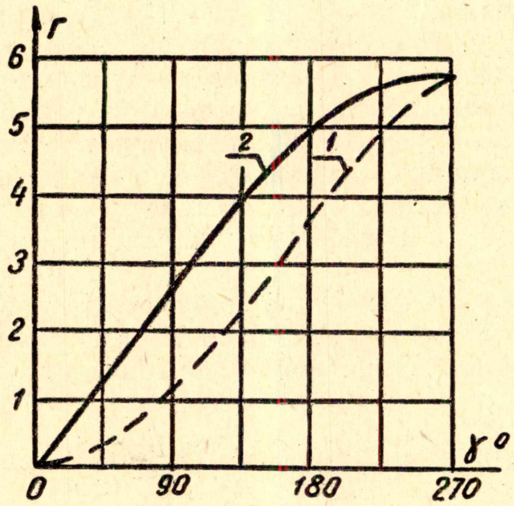

Рис. 1.

Частные производные $\frac{\partial C}{\partial b}$, $\frac{\partial C}{\partial r}$, $\frac{\partial C}{\partial b}$, $\frac{\partial C}{\partial r_1}$, $\frac{\partial \Gamma}{\partial \gamma}$ могут быть вычислены на основании формул и графиков, приведенных в работе [2].

Пусть некоторому освоенному или проектируемому технологическому процессу соответствуют конкретные значения относительных погрешностей $\frac{\Delta A}{A}$, $\frac{\Delta b}{b}$,..., $\frac{\Delta\mu}{\mu}$, достижимые при равных затратах. Примем одну из относительных погрешностей, например $\frac{\Delta A}{A}$, за эталонную и вычислим коэффициенты

$$n_B=\frac{\frac{\Delta b}{b}}{\frac{\Delta A}{A}},\quad n_{r_1}=\frac{\frac{\Delta r_1}{r_1}}{\frac{\Delta A}{A}},\ldots,\quad n_\mu=\frac{\frac{\Delta\mu}{\mu}}{\frac{\Delta A}{A}}.$$

Формула для определения относительной погрешности перемещения конца пружины может быть представлена в виде

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \pm\frac{\Delta A}{A}\left[|\alpha_A| + n_b\cdot|\alpha_B| + \ldots + n_\mu|\alpha_\mu|\right].$$

Пусть δ — допустимое значение относительной погрешности величины λ. Чтобы обеспечить заданный допуск на величину λ при наименьших затратах, необходимо установить следующие предельные значения относительных погрешностей параметров:

$$\frac{\Delta A}{A} = \frac{\delta}{|\alpha_A| + n_b|\alpha_b| + \ldots + n_\mu|\alpha_\mu|},\quad \frac{\Delta b}{b} = n_b\frac{\Delta A}{A}, \ldots,\quad \frac{\Delta\mu}{\mu} = n_\mu\frac{\Delta A}{A}. \tag{5}$$

Поскольку отклонения значений параметров от номинальных значений носят случайный характер, вероятность того, что относительная погрешность величины λ достигнет предельного значения δ, очень мала. В случае, если расширение допусков на отклонения параметров позволяет снизить производственные затраты, можно допустить такое расширение за счет того, что какая-то часть пружины будет изготовлена с отклонениями величины λ, выходящими за пределы допуска. При этом достигаемый эффект должен превосходить потери от брака.

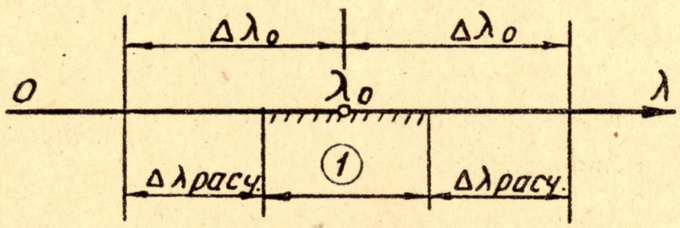

Рис. 2. $\lambda_0 + \Delta\lambda_0$ — номинальное значение перемещения конца пружины и допуск, установленные проектировщиком;
1 — область возможных отклонений истинного номинального значения перемещения конца пружины от значения λ_0, установленного проектировщиком;
$\pm\lambda_{0\,расч}$ — допуск, исходя из которого следует определять допуски на значения параметров

Соотношения (5) получены в предположении, что перемещение конца пружины, соответствующее номинальным значениям параметров, известно.

На практике трудно точно установить величину перемещения λ конца пружины, соответствующую номинальным значениям параметров. Необходимо считаться с тем, что номинальное значение перемещения конца пружины на практике всегда будет задано с некоторым отклонением от истинного значения, следовательно, при выборе допускаемых отклонений параметров можно рассчитывать только на часть поля допуска, установленного для λ (рис. 2).

Вследствие того, что размеры пружины на рабочих чертежах задаются иначе, чем при теоретическом рассмотрении, некоторые отклонения параметров, которые здесь полагаются независимыми, могут оказаться взаимосвязанными. Это следует учитывать при применении рассмотренной методики в конкретных расчетах.

Подобным же образом можно проанализировать влияние отклонений геометрических и механических параметров на величину максимальных напряжений, тягового момента и изменения объема полости.

Пример.

Рассчитать допуски на основные параметры пружины для измерения давления до 0,6 *кг/см²*, размеры которой указаны на рис. 3, исходя из условия, что отклонения величины перемещения конца пружины от номинального значения не должны превышать $\delta \pm 20\%$. Модуль упругости $E=1{,}28\cdot10^6$ *кг/см²*, коэффициент Пуассона $\mu=0{,}32$. Рассматриваемой пружине соответствуют следующие значения параметров: $A=$ $=1{,}88$ *см*, $b=0{,}194$; $r_1=0{,}0425$, $r_0=2{,}86$; $h=0{,}0106$; $E=1{,}28\cdot10^6$ *кг/см²*; $\mu=0{,}32$; $\gamma=4{,}2$.

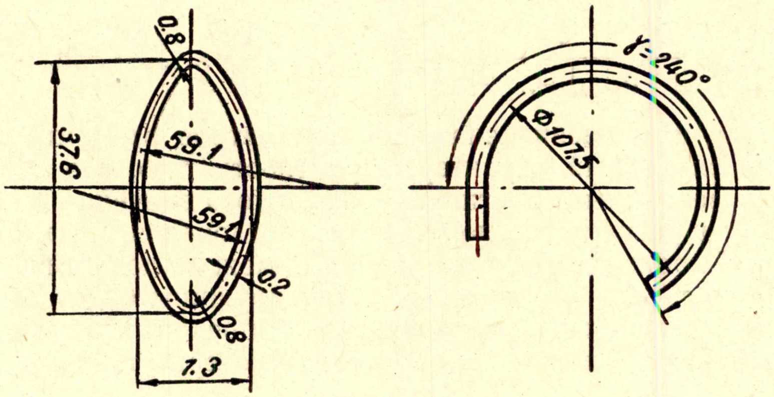

Рис. 3

Значения коэффициентов C_1, C, Γ, производных $\frac{\partial C_1}{\partial b}$, $\frac{\partial C_1}{\partial r_1}$, $\frac{\partial C}{\partial b}$, $\frac{\partial C}{\partial r_1}$, $\frac{\partial \Gamma}{\partial \gamma}$ определим по графикам [2]:

$$C_1=0{,}185;\quad C=0{,}0024;\quad \Gamma=5{,}3;\quad \frac{\partial C_1}{\partial b}\approx-0{,}91;$$

$$\frac{\partial C_1}{\partial r_1}\approx0{,}06;\ \frac{\partial C}{\partial b}\approx-0{,}01;\ \frac{\partial C}{\partial r_1}\approx0{,}03;\ \frac{d\Gamma}{d\gamma}\approx1{,}26.$$

По формулам (4) вычислим значения коэффициентов $\alpha_A=1$; $\alpha_b=$ $=-0{,}18$; $\alpha_{r_1}=-0{,}5$; $\alpha_h=-1{,}07$; $\alpha_{r_0}=2{,}93$; $\alpha_\gamma=1$; $\alpha_E=-1$; $\alpha_\mu=-$ $-0{,}007$.

Значение коэффициента α_μ определено в предположении, что рассматривается перемещение λ точки на оси пружины, соответствующей концу активной части пружины. Практический интерес представляет перемещение точки крепления тяги механизма, обычно также находящейся на оси пружины, но расположенной на некотором расстоянии от конца активной части. Так, если предположить, что положение точки крепления тяги определяется центральным углом 270°, а дуга активной части соответствует углу 240°, то при помощи графика 2 на рис. 1 найдем: $\alpha_\gamma=0{,}25$. Вообще, чтобы уменьшить влияние технологической погрешности центрального угла γ на величину перемещения конца пружины, следует выбирать значения γ, соответствующие пологому участку графика $\Gamma(\gamma)$. При этом для пружины с удлиненным наконечником можно брать меньшие значения γ.

Предположим, что относительная точность параметров, соответствующая установившемуся производству, характеризуется следующими коэффициентами:

$$n_b=n_h=n_{r_0}=n_\gamma=n_E=n_\mu=1;\quad n_{r_1}=3.$$

Тогда относительное отклонение величины перемещения конца пружины, соответствующее заданным положительным отклонениям параметров, определяется по формуле:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda}=\frac{\Delta A}{A}-0{,}18\frac{\Delta b}{b}-0{,}5\frac{\Delta r_1}{r_1}-1{,}07\frac{\Delta h}{h}+2{,}93\frac{\Delta r}{r_0}+0{,}25\frac{(\Delta\gamma)^*}{\gamma}-$$

$$-\frac{\Delta E}{E}-0{,}007\frac{\Delta\mu}{\mu}.$$

По абсолютной величине и знаку коэффициентов в правой части формулы можно получить наглядное представление о влиянии отклонений параметров на отклонение величины перемещения конца пружины от номинального значения. Так, отклонение значения коэффициента μ от номинального окажет очень малое влияние на величину λ. Наибольшее влияние на величину $\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$ оказывают погрешности $\frac{\Delta r_0}{r_0}$, $\frac{\Delta h}{h}$, $\frac{\Delta E}{E}$ и $\frac{\Delta A}{A}$. По формулам (5) найдем

$$\frac{\Delta A}{A}=\frac{\Delta b}{b}=\frac{\Delta h}{h}=\frac{\Delta R_0}{R_0}=\frac{(\Delta\gamma)^*}{\gamma}=\frac{\Delta E}{E}=2{,}5\%,$$

$$\frac{\Delta r}{r}=3\cdot\frac{\Delta A}{A}=7{,}5\%.$$

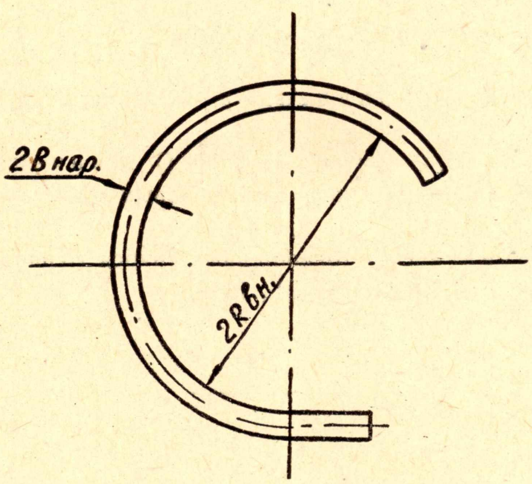

Рис. 4.

При необходимости уменьшить возможные отклонения величины λ от номинального значения наибольший эффект может быть достигнут уменьшением допусков на те параметры, для которых коэффициент α имеет большую абсолютную величину. Так, уменьшение допустимой относительной погрешности параметра r_0 в 2 раза позволяет уменьшить величину $\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$ на 18%. Такое же уменьшение относительной погрешности параметра b приводит к уменьшению величины $\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$ на 1%, т. е. в 18 раз менее эффективно.

Пусть вместо параметров r_0 и b на чертеже пружины заданы размеры, указанные на рис. 4. Полагая для простоты, что параметры h и A имеют номинальное значение, проанализируем связь между возможными отклонениями параметров r_0 и b. Предположим, что возможные отклонения от номинального значения для размера $B_{\text{нар}}$ ограничены величиной $A\cdot\Delta b$, для размера R — величиной $A\cdot\Delta r_0$. Относительная погрешность параметра b будет равна $\frac{\Delta b}{b}$. Относительная погрешность параметра R_0 будет равна

$$\frac{\Delta r_0+\Delta b}{r_0}=\frac{\Delta r_0}{r_0}+\frac{b}{r_0}\cdot\frac{\Delta b}{b}.$$

Подставив в формулу (4) значения относительных погрешностей параметров b и R_0, найдем, что коэффициент при $\frac{\Delta r_0}{r_0}$ сохраняет прежнее значение α_{r_0}, а коэффициент при $\frac{Ab}{b}$ имеет следующую величину

$$\alpha'_B=\alpha_B+\frac{b}{r_0}\cdot\alpha_{r_0};$$

После подстановки числовых значений величин получим $\alpha'_B=0{,}019$, что значительно меньше прежнего значения $\alpha_0=-0{,}18$. Таким образом, задание параметров r_0 и b пружины в соответствии с рис. 4 в рассматриваемом случае приводит к значительному уменьшению влияния погрешности параметра b на величину перемещения конца пружины.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Боднер, Н. И. Фридлендер. Авиационные приборы. Оборонгиз, М., 1960.

2. М. П. Шумский, О. С. Зинкевич, Ю. П. Минченков. Единая инженерная методика расчета основных типов одновитковых манометрических пружин. Изв. ТПИ, т. 192, 1969.

3. В. И. Феодосьев. Расчет тонкостенных трубок Бурдона эллиптического сечения энергетическим методом. Оборонгиз, М., 1940.