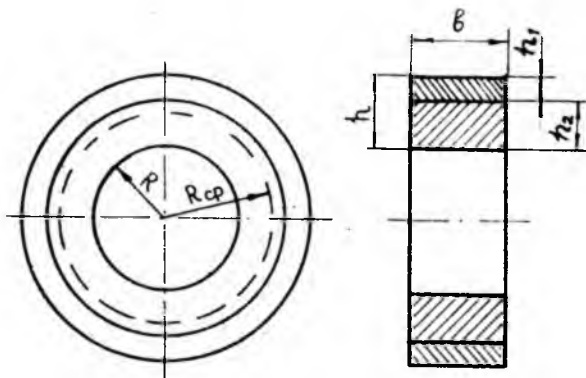


УДК 539.319.001.24

Ф.П.Урывский, В.Н.Трусов, В.М.Опарин, М.Е.Маркушин

РАСЧЕТ ОКРУЖНЫХ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ
В КОЛЬЦЕ С ПОКРЫТИЕМ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ

Все более широкое распространение износостойких покрытий, предназначенных для защиты рабочих поверхностей деталей, вызывает необходимость определения остаточных напряжений, наводимых в них различными видами обработки. В связи с этим поставлена следующая задача: на подложке-кольце с внутренним радиусом R , толщиной h_2 , шириной b из материала с модулем упругости E_2 , находится кольцевой слой материала толщиной h_1 , с модулем упругости E_1 , нанесенный плазменным напылением и подвергнутый механической обработке (рис.1). Требуется определить окружные остаточные напряжения в напыленном слое и поверхностных слоях подложки.



Р и с. 1. Геометрические характеристики кольцевого образца

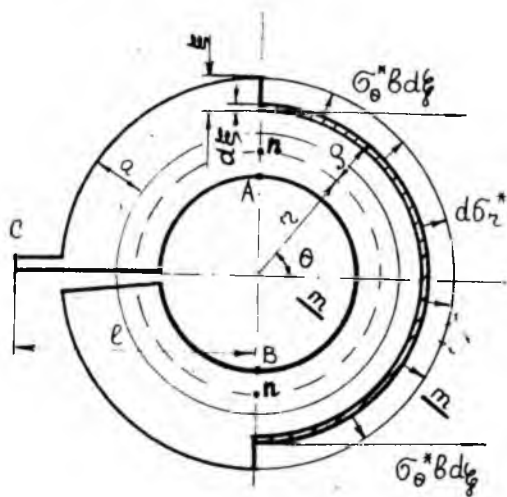
Для определения остаточных напряжений по методу Н.Н.Давиденко кольцо разрезается и подвергается травлению с наружных (внутренних) слоев. По деформациям кольца методами теории изгиба стержней определяются остаточные напряжения. При $R_{cp}/h < 5$ погрешность при использовании теории изгиба прямых стержней может превосходить 7% согласно работам [2], [3]. В этом случае должна, вообще говоря, учитываться начальная кривизна кольца.

Перейдем к определению остаточных напряжений. Пусть с разрезанного кольца снят слой толщины ξ (в данный момент снимается слой толщины $d\xi$) и к моменту снятия в нем действуют остаточные напряжения $\sigma_{\theta}^*(\xi)$ (рис.2). Согласно работе [1], в произвольном сечении $m-m$ снимаемый слой создает изгибающий момент

$$dM(\xi) = \sigma_{\theta}^*(\xi) b \rho(\xi) d\xi \quad (1)$$

($\rho(\xi)$ - расстояние от поверхности травления до нейтрального слоя) и нормальное усилие, приложенное в нейтральном слое:

$$dN(\xi) = -\sigma_{\theta}^*(\xi) b d\xi. \quad (2)$$



Р и с. 2. Расчетная схема для определения остаточных напряжений

Положительными являются растягивающие напряжения, растягивающее усилие, изгибающий момент, уменьшающий кривизну кольца. Действие системы сил, создаваемых удаленным слоем, заменим действием двух таких систем, что в произвольном сечении $m-m$ первая из них (f_1) создает лишь изгибающий момент (1), вторая (f_2) - лишь нормальное усилие (2), приложенное в нейтральном слое.*

При удалении снимаемого слоя кольцо деформируется. Напряжение $\sigma_0^*(\xi)$ принято выражать через приращение диаметра AB в направлении $A-B$. Но это приращение будет вызвано лишь действием системы f_1 . Система f_2 , не изменяя кривизны кольца, изменит лишь величину зазора в месте разреза. Действие системы f_1 является чистым изгибом полукольца, системы f_2 - "чистым растяжением".

При травлении деформации измеряются в области разреза, по соображениям удобства. Они представляют собой сумму перемещений от действия первой и второй систем сил. Обозначим их δ_1 и δ_2 соответственно. Для однородных колец δ_2 невелико по сравнению с δ_1 . Но если на однородное кольцо нанести слой более твердого материала, то его жесткость на изгиб возрастет больше, чем его жесткость на растяжение. Это может привести к тому, что перемещения δ_1 и δ_2 будут вполне сравнимы по величине. Так, расчет, проведенный для кольца $R_{cp}/h = 3$, $h_2/h_1 = 10$, $E_1/E_2 = 6$ показал, что доля перемещений δ_2 в суммарном перемещении достигает 6% и возрастает при увеличении жесткости напыленного слоя. В связи с вышесказанным при расчете достаточно толстых и жестких покрытий с использованием традиционной схемы измерения деформаций, целесообразно учитывать действие системы сил f_2 .

С учетом сделанных замечаний определим напряжение $\sigma_0^*(\xi)$ по перемещению точки C . Пусть $\xi < h_1$. Применяя метод Мора, используя известные результаты теории изгиба кривых стержней [3, 4], получим:

$$\sigma_0^*(\xi) = - \frac{F(\xi)z(\xi)}{8 \{ \pi l z(\xi) + [\pi l + 2z(\xi)] \rho(\xi) \}} \frac{d\delta_0}{d\xi}, \quad (3)$$

где $F(\xi)$ - приведенная площадь сечения,

* Легко видеть, что второй системой будут усилия $\sigma_0^*(\eta) \delta d\xi$, перенесенные в нейтральный слой $m-m$ и радиальные усилия $d\sigma_0^*(\xi)$. Первой системой будет изгибающий момент, численно равный $dM_0^*(\xi)$, компенсирующий этот перенос.

$$F(\xi) = \beta [E_1 (h_1 - \xi) + E_2 h_2]; \quad (4)$$

где $z(\xi)$ - радиус нейтральной оси,

$$z(\xi) = \frac{F(\xi)}{\beta [E_1 \ln \frac{R+h-\xi}{R+h_2} + E_2 \ln \frac{R+h_2}{R}]}; \quad (5)$$

$\rho(\xi)$ - расстояние от поверхности травления до нейтральной оси,

$$\rho(\xi) = R + h - \xi - z(\xi); \quad (6)$$

$Z(\xi)$ - расстояние от нейтральной оси до параллельной ей прямой, проходящей через центр тяжести сечения $m-m$,

$$Z(\xi) = \frac{S(\xi)}{F(\xi)} - z(\xi); \quad (7)$$

$S(\xi)$ - момент площади сечения относительно оси кольца,

$$S(\xi) = \frac{1}{2} E_1 \beta [(R+h-\xi)^2 - (R+h)^2] + \frac{1}{2} E_2 \beta [(R+h)^2 - R^2]. \quad (8)$$

В формуле (3) приращение $d\sigma_c$ положительно при увеличении зазора в месте разреза.

Пусть $\sigma_\theta(a)$ - окружные остаточные напряжения, существовавшие в слое a (т.е. в слое на глубине a от исходной поверхности) до разрезки и травления. Используя равенство (3) и повторяя рассуждения и выкладки, выполненные в работах [1,2], при $a < h_1$ получим:

$$\sigma_\theta(a) = E_1 \frac{\rho(0) - a}{2z(0)R(a)} \sigma_p - \frac{F(a)z(a)}{\beta \{ \pi l z(a) + [\pi l + 2z(a)] \rho(a) \}} \times$$

$$\times \frac{d\sigma_c}{da} + \frac{E_1}{R(a)} \int_0^a \frac{[R(a) - z(\xi)] \rho(\xi) + R(a) z(\xi)}{\pi l z(\xi) + [\pi l + 2z(\xi)] \rho(\xi)} \frac{d\sigma_c}{d\xi} d\xi, \quad (9)$$

где $d\sigma_p$ - приращение диаметра AB после разрезки кольца;

$R(a)$ - радиус слоя a , $R(a) = R + h - a$.

Первое слагаемое правой части равенства (9) учитывает напряжения, снимающиеся при разрезке кольца, второе - при стравливании слоя толщиной da на глубине a , третье - при стравливании слоя толщиной a .

Расчет по формуле (9) связан с большим объемом вычислений. Его целесообразно проводить на ЭВМ. Пренебрегая в целях упрощения сопротивлением изгибу напыленного слоя, можно получить приближенную формулу для расчета окружных остаточных напряжений:

$$\sigma_{\theta}(a) = E_1 \frac{h}{(2R+h)^2} \sigma_p - E_2 \frac{h^2}{3(2R+h)(2R+h+\pi t)} \frac{d\delta_c}{da} + \frac{4}{3} E_1 \frac{h}{(2R+h)(2R+h+\pi t)} \sigma_c(a), \quad (10)$$

где $\delta_c(a)$ - перемещение точки C при стравливании слоя толщиной a (положительно при увеличении зазора в месте разреза). При выводе формулы (10) кольцо рассматривалось как стержень малой кривизны.

Если расхождение результатов расчетов по формулам (9) и (10) достаточно велико, то следует пользоваться формулой (9). В этом случае формулу (10) можно использовать для контроля правильности расчета на ЭВМ.

Формулами (9), (10) можно пользоваться при расчете остаточных напряжений и в многослойных покрытиях. В этом случае в правые части равенств (4), (5), (8) необходимо добавить соответствующие слагаемые, учитывающие наличие дополнительных слоев, а в формуле (10) модуль упругости E_1 следует заменить на модуль упругости слоя, который находится на глубине a .

Для расчета остаточных напряжений в подложке в правых частях равенств (4), (5), (8) нужно оставить только вторые слагаемые (в формуле (5) - второе слагаемое в знаменателе)^{*}, в формуле (10) модуль E_1 нужно заменить на E_2 .

Л и т е р а т у р а

1. Б и р г е р И.А. Остаточные напряжения - М.: Машгиз, 1963.
2. Б а р в и н о к В.А., Б о г д а н о в и ч В.И., К о з л о в Г.М. Определение остаточных напряжений в многослойных кольцах. Известия высших учебных заведений. Сер. Машиностроение, 1980, 4.
3. Б е л я е в Н.М. Сопротивление материалов - М.: Наука, 1976.
4. С н и т к о Н.К. Сопротивление материалов - Л.: ЛГУ, 1975.

* Это замечание не распространяется на подынтегральную функцию при интегрировании ее от 0 до h_1 .