

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСТИННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ВАЛОВ В УСЛОВИЯХ ГИСТЕРЕЗИСА

Богуцкий В.Б.

Севастопольский государственный университет, г. Севастополь

Ключевые слова: быстроходный ротор, центробежные силы, деформация вала, гистерезис.

Аннотация. Отмечается, что в процессе эксплуатации угловые скорости быстроходных роторов во многих случаях превосходят критические значения, в результате чего в материале валов роторов возникают значительные динамические нагрузки и гистерезисные явления. Показано, что для определения реальной деформации в сечениях вала необходимо определять энергию деформации и наибольшую составляющую прогиба вала ротора.

THE DEFINITION OF TRUE DEFORMATIONS OF THE SHAFTS IN CONDITIONS OF HYSTERESIS

Bogutskiy V.B.

Sevastopol State University, Sevastopol

Keywords: high-speed rotor, centrifugal forces, shaft deformation, hysteresis.

Abstract. It is noted that during operation, the angular velocities of high-speed rotors in many cases exceed the critical values, as a result of which significant dynamic loads and hysteresis phenomena appear in the material of the rotor shafts. It is shown that in order to determine the real deformation in the shaft sections, it is necessary to determine the deformation energy and the largest component of the rotor shaft deflection.

В современной технике значительную роль играют приборы и устройства с быстроходными роторами. Во многих случаях угловые скорости роторов таких устройств в рабочих режимах превосходят критические значения. В связи с несовершенством балансировки быстроходных роторов возникают центробежные силы, в результате чего в материале валов роторов возникают значительные динамические нагрузки, вынужденные колебания и гистерезисные явления. При этом деформированная ось вала выходит из плоскости действия рабочих нагрузок. В этих случаях полная деформация оси может быть определена как сумма деформаций, расположенных в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, что существенно затрудняет ее измерение и учет. Поэтому в инженерной практике в большинстве случаев определяют только основные составляющие деформации, лежащие в плоскостях рабочих нагрузок [1, 2 и др.].

Принимая во внимание, что петля гистерезиса в координатах $\sigma - f$ (напряжение – деформация) ограничивает площадь, представляющую собой цикловую энергию деформации ω , можно определить истинные деформации в сечениях вала с наименьшими погрешностями. Для решения этой задачи необходимо определить энергию деформации ω и наибольшую составляющую прогиба вала f_l в рассматриваемом сечении (рис. 1) [3].

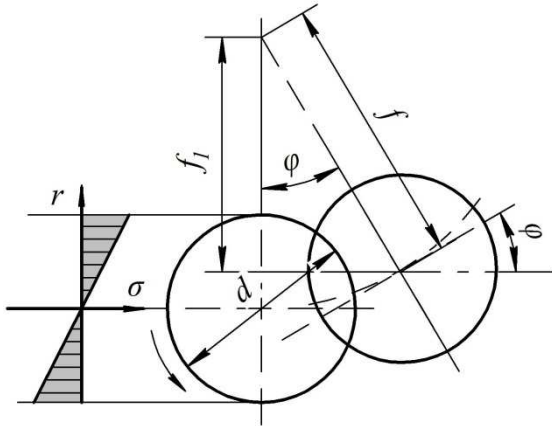


Рис. 1. Схема отклонения сечения вала при его вращении, вызванного гистерезисом, и эпюра распределения напряжений

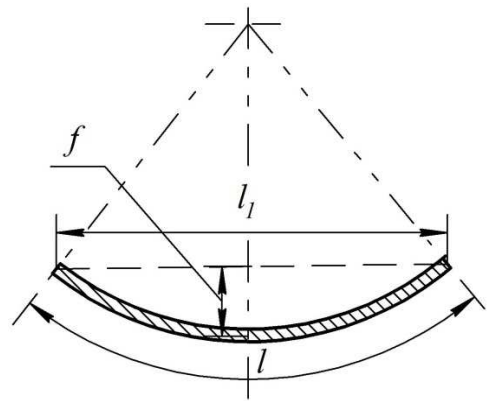


Рис. 2. Схема деформации вала

Поскольку отношение прогиба f к пролету l_1 составляет $0,001 \dots 0,002$, т. е. пролет практически равен длине вала l , а его ось представляет собой дугу окружности (рис. 2) или кривую, близкую к ней, деформацию волокон можно представить в виде $\Delta l = \frac{2f}{l} d$, где d – текущий диаметр сечения вала.

В связи с неравномерным напряженным состоянием изменение напряжений по сечению может быть выражено уравнением прямой с угловым коэффициентом $\sigma = \frac{2\sigma_a}{d} r$, где σ_a – амплитуда напряжений в поверхностном слое; σ – текущее напряжение в сечении; r – текущий радиус сечения вала.

Из-за высоких значений пределов пропорциональности для сталей характерна петля гистерезиса в виде ромба (рис. 3). В этом случае деформации можно рассчитать как

$$\Delta \omega = 2\sigma \Delta l \Delta F = \frac{32\pi \cdot f_r \sigma_a}{ld} r^3 dr.$$

где $\Delta F = 2\pi r dr$; f_r – остаточный прогиб гистерезиса.

Тогда площадь петли гистерезиса

$$\omega = \frac{32\pi \cdot f_r \sigma_a}{ld} \int_0^{d/2} r^3 dr = \frac{\pi d^3}{2l} f_r \sigma_a.$$

При данных значениях d и l окончательно получим $f_r = \omega / k \sigma_a$, где k – коэффициент.

Таким образом, тангенс угла между нейтральными плоскостями напряжений и деформаций определяется как $\operatorname{tg} \varphi = f_r / \sigma_a$, а полный прогиб вала $f = f_1 / \cos \varphi$.

Проверка точности измерений прогибов вала, без учета гистерезисных явлений методом, основанным на вышеизложенных теоретических соображениях, не показала существенных погрешностей. Разница результатов определения деформации обоими методами составляет всего лишь доли процента.

На рис. 4 показаны изменения прогибов валов, изготовленных из стали 45, $d=10$ мм и $l=100$ мм, которые подвергались циклическому деформированию (N – число циклов) при различных напряжениях и различном числе циклов.

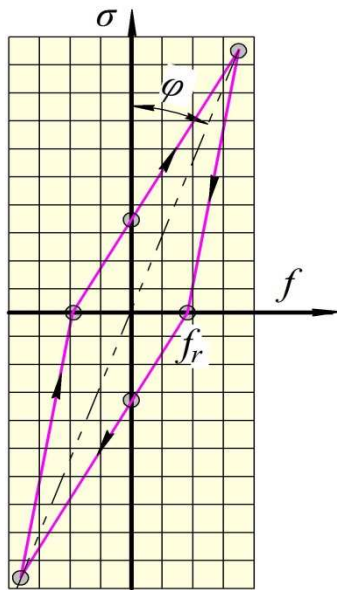


Рис. 3. Петля гистерезиса

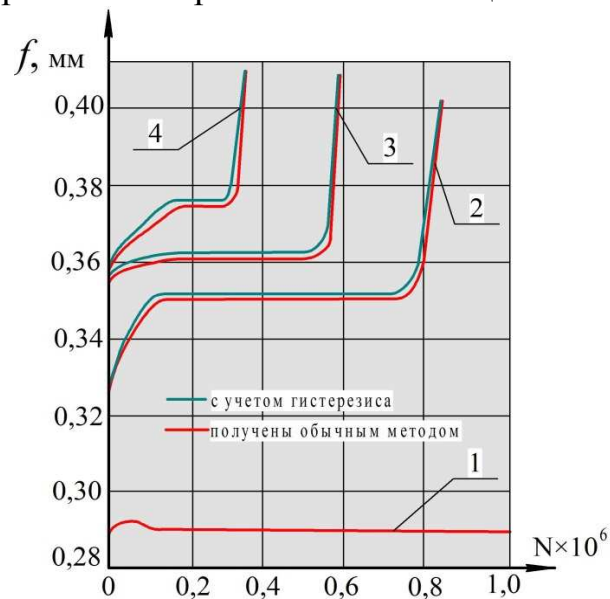


Рис. 4. Изменения прогибов валов в процессе их деформирования при напряжениях, МПа: 1 – 310; 2 – 320; 3 – 340; 4 – 350

Разрушение происходило, если напряжения превышали предел выносливости σ_R или если эксперимент протекал при неограниченном числе циклов (кривая 1), когда амплитуда напряжений не превышала σ_R .

Минимальная разность величин f и f_1 даже при значительных перенапряжениях (кривая 4) обусловлена малым углом увода плоскости, в которой лежит изогнутая ось вала, из плоскости рабочих нагрузок, достигающим всего нескольких минут. Поэтому измерение прогибов валов быстроходных роторов вполне допустимо без учета гистерезисных явлений, протекающих в их материалах.

Список литературы

1. Никифоров А.Н. Состояние проблемы уравнивания роторов // Вестник научно-технического развития. 2013. №4 (68). С. 20-28.
2. Диментберг Ф.М. Изгибные колебания вращающихся валов. – М.: АН СССР, 1959. – 248 с.
3. Гуляев В.И., Баженов В.А., Попов С.Л. Прикладные задачи теории нелинейных колебаний механических систем. – М.: Высшая школа, 1989. – 383с.

Сведения об авторе:

Богущий Владимир Борисович – к.т.н., СевГУ, г. Севастополь.