Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

В. А. Кирпичёв, В. С. Вакулюк, Ю. Н. Сургутанова, О. В. Каранаева, Остаточные напряжения и сопротивление усталости цилиндрических винтовых пружин, *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2008, выпуск 2(), 254–257

DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu618>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 52.23.180.231

26 апреля 2023 г., 17:59:43

Механика деформируемого твёрдого тела

УДК 621.787:539.319

ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ВИНТОВЫХ ПРУЖИН

*В. А. Кирпичёв, В. С. Вакулюк, Ю. Н. Сургутанова,
О. В. Каранаева*

Самарский государственный аэрокосмический университет им. ак. С.П. Королёва,
443086, г. Самара, Московское ш., 34.

E-mail: karanaeva@mail.ru

Определены остаточные напряжения, проведены испытания на усталость цилиндрических винтовых пружин. Показано, что упрочнение приводит к увеличению сопротивления усталости, причём приращение предела выносливости находится в соответствии с уровнем сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое пружин.

Ключевые слова: цилиндрические винтовые пружины, остаточные напряжения, приращение предела выносливости, сопротивление усталости.

Одним из резервов повышения качества, надёжности и ресурса техники является использование при изготовлении деталей современных видов и средств упрочняющей технологии. Применение этой технологии позволяет существенно повысить сопротивление усталости и контактной коррозии, статическую прочность в условиях хрупкого разрушения и другие виды работоспособности. Влияние технологии упрочнения проявляется через ряд факторов качества поверхностного слоя, среди которых остаточные напряжения играют основную роль [1]. Особенно важно знать влияние этого фактора на сопротивление усталости, т. к. дефекты, связанные с усталостными разрушениями деталей, наиболее распространены.

Усталостные разрушения пружин зачастую приводят к серьёзным авариям промышленных и бытовых агрегатов. Оценить прочность пружин при длительных переменных рабочих нагрузках можно, проведя испытания на многоцикловую усталость и сопоставив результаты испытаний с результатами исследования остаточных напряжений.

В настоящей работе изучалось влияние остаточных напряжений на предел выносливости пружин крепления мотор-компрессора бытовых отечественных холодильников, изготовленных из стали 65Г и имеющих следующие параметры: средний диаметр пружины $D = 40$ мм; диаметр проволоки пружины $d = 2$ мм; число витков пружины $n = 5$.

Для определения остаточных напряжений в пружинах были получены формулы с использованием подходов, разработанных в работах [2, 3]. В этих работах было показано, что при удалении слоёв цилиндра в пределах центрального угла α (рис. 1), он изгибается и закручивается.

Связь между углом взаимного поворота $\theta(a)$ концевых сечений при изгибе с осевыми $\sigma_z(\xi)$ и окружными $\sigma_\theta(\xi)$ остаточными напряжениями в тонком поверхностном

Кирпичёв Виктор Алексеевич — доцент каф. сопротивления материалов Самарского государственного аэрокосмического университета; к.т.н., доцент.

Вакулюк Владимир Степанович — доцент каф. сопротивления материалов Самарского государственного аэрокосмического университета; к.т.н., доцент.

Сургутанова Юлия Николаевна — доцент каф. сопротивления материалов Самарского государственного аэрокосмического университета; к.т.н.

Каранаева Оксана Валериевна — доцент каф. сопротивления материалов Самарского государственного аэрокосмического университета; к.т.н.

слой имеет вид

$$\theta(a) = \frac{32l \sin \frac{\alpha}{2}}{E\pi d^2} \int_0^a [\sigma_z(\xi) - \mu\sigma_\theta(\xi)] d\xi, \quad (1)$$

где a — толщина удалённого слоя; l — длина участка цилиндра, в пределах которого производится удаление слоёв; E — модуль продольной упругости; d — диаметр цилиндра; ξ — текущая координата.

Угол закручивания $\psi(a)$ через касательные напряжения $\tau_{\theta z}$ выражается в следующем виде:

$$\psi(a) = \frac{8\alpha l}{G\pi d^2} \int_0^a \tau_{\theta z}(\xi) d\xi, \quad (2)$$

где G — модуль упругости при сдвиге.

Любой элемент пружины длиной ds можно рассматривать как прямой брус и применить к нему формулу (1). Если удаление слоёв производится в пределах наружной поверхности (рис. 2), то каждый элемент пружины изгибается в плоскости витка и закручивается. Первая деформация приводит к закручиванию пружины, вторая — к изменению её длины.

При сложении перемещений всех элементов имеем

$$\lambda(a) = \pm \frac{4n\pi D^2}{Gd^2}, \quad (3)$$

$$\varphi(a) = \frac{32nD}{Ed^2} \int_0^a [\sigma_z(\xi) - \mu\sigma_\theta(\xi)] d\xi, \quad (4)$$

Рис. 1. Схема удаления слоёв цилиндра

Рис. 2. Схема удаления слоёв пружины

где $\lambda(a)$, $\varphi(a)$ — удлинение и угол закручивания пружины после удаления слоя толщиной a ; n — число витков, на которых удаляются слои; $\lambda > 0$ при увеличении длины пружины; $\varphi > 0$ при увеличении кривизны оси витка.

В формуле для $\lambda(a)$ знак плюс предназначен для пружин левого, а минус — для пружин правого подъёма. После дифференцирования выражений (3) и (4) по a получены формулы для вычисления остаточных напряжений в тонком поверхностном слое пружины

$$\tau_{\theta z}(a) = \pm \frac{Gd^2}{4n\pi D^2} \cdot \frac{d\lambda(a)}{da}, \quad (5)$$

$$\sigma_z(a) - \mu\sigma_\theta(a) = \frac{Ed^2}{32nD} \cdot \frac{d\varphi(a)}{da}. \quad (6)$$

При исследовании внутренних слоёв в формуле (6) необходимо изменить знак на обратный. Следует заметить, что формулы (5) и (6) применимы для определения напряжений, которые изменяются лишь в зависимости от глубины залегания слоя.

По формуле (6) были определены остаточные напряжения в неупрочнённых (исходное состояние) пружинах, а также в пружинах после упрочнения:

- микрошариками диаметром 0,1 мм на роторной установке при диаметре колеса 300 мм и частоте вращения 3600 об/мин;
- стальной дробью диаметром 0,5÷1 мм при давлении воздуха $P = 0,2$ МПа;
- стальной дробью диаметром 0,5÷1 мм при давлении воздуха $P = 0,2$ МПа в заневоленном состоянии при растяжении пружин на 12 мм.

Эпюры остаточных напряжений приведены на рис. 3.

Можно видеть, что после всех видов упрочнения в поверхностных слоях пружин возникают сжимающие остаточные напряжения. При упрочнении микрошариками диаметром 0,1 мм максимум сжимающих остаточных напряжений находится на поверхности. Увеличение диаметра индентора повышает глубину проникновения пластической деформации и, следовательно, глубину и уровень залегания сжимающих остаточных напряжений. Максимум сжимающих напряжений в этом случае находится на глубине 0,04 мм, а к поверхности наблюдается спад до 450 МПа. Заневоливание увеличивает уровень сжимающих остаточных напряжений, особенно на поверхности.

Испытания пружин на усталость проводились при отнулевом цикле растяжения. Результаты определения предела выносливости τ_0 и его приращения $\Delta\tau_0$ приведены в таблице. Нумерация вариантов таблицы совпадает с номерами вариантов рис. 3.

Анализируя данные определения остаточных напряжений и результаты испытаний на усталость, можно видеть, что во всех случаях упрочнение приводит к увели-

Рис. 3. Остаточные напряжения в пружинах: 1 — неупрочнённых; 2 — упрочнённых микрошариками на роторной установке; 3 — упрочнённых дробью на пневмодробеструйной установке; 4 — упрочнённых дробью на пневмодробеструйной установке в заневоленном состоянии

Результаты испытаний пружин на усталость

Вариант	Технология изготовления пружин	τ_0 , МПа	$\Delta\tau_0$, МПа
1	Неупрочнённые	270	—
2	Упрочнённые микрошариками на роторной установке	320	50
3	Упрочнённые дробью на пневмодробеструйной установке	365	95
4	Упрочнённые дробью на пневмодробеструйной установке в заневоленном состоянии	410	140

чению сопротивления усталости, причём приращение предела выносливости находится в соответствии с уровнем и распределением сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое пружин [4].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Павлов, В. Ф. Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений [Текст] / В. Ф. Павлов, В. А. Кирпичёв, В. Б. Иванов. — Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2008. — 64 с.
2. Биргер, И. А. Остаточные напряжения [Текст] / И. А. Биргер. — М.: Машгиз, 1963. — 232 с.
3. Иванов, С. И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок [Текст] / С. И. Иванов / В сб. научн. тр. КуАИ. — Куйбышев: КуАИ. — 1971. — Вып. 53. — С. 32–42.
4. Павлов, В. Ф. Влияние характера распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя детали на сопротивление усталости [Текст] / В. Ф. Павлов // Извест. вузов. Машиностроение. — 1987. — № 7. — С. 3–6.

Поступила в редакцию 02/II/2008;
в окончательном варианте — 18/IX/2008.

MSC: 74L99

RESIDUAL STRESSES AND FATIGUE RESISTANCE OF CYLINDRICAL VOLUTE SPRINGS

V. A. Kirpichev, V. S. Vakuljuk, Y. N. Surgutanova, O. V. Karanaeva

S. P. Korolyov Samara State Aerospace University,
443086, Samara, Moskovskoe sh., 34.

E-mail: karanaeva@mail.ru

Residual stresses are determined, fatigue tests of volute springs are conducted. It is demonstrated, that hardening generates the increase of fatigue resistance, moreover, fatigue limit excess depends on the level of compressive residual stresses in spring super facial layer.

Key words: *cylindrical volute springs, residual stresses, fatigue limit resistance, fatigue resistance.*

Original article submitted 02/II/2008;
revision submitted 18/IX/2008.

Kirpichev Viktor Alexeevich, Ph. D. (Techn.) Assist. Prof., Dept. of Resistance Materials of Samara State Aerospace University.
Vakuljuk Vladimir Stepanovich, Ph. D. (Techn.) Assist. Prof., Dept. of Resistance Materials of Samara State Aerospace University.
Surgutanova Yuliya Nikolaevna, Ph. D. (Techn.), Dept. of Resistance Materials of Samara State Aerospace University.
Karanaeva Oksana Valerievna, Ph. D. (Techn.), Dept. of Resistance Materials of Samara State Aerospace University.