

УДК 629.7.064.5; 629.78.05; 89.25.21
Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-2-190-201

Для цитирования: Гришин А. А. Обеспечение долговечности и надежности контактных колец токосъемных устройств при работе в упруго-пластическом состоянии // Сибирский аэрокосмический журнал. 2024. Т. 25, № 2. С. 190–201. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-2-190-201.

For citation: Grishin A. A. [Ensuring durability and reliability of contact rings of current collection devices when working in elastic-plastic state]. *Siberian Aerospace Journal*. 2024, Vol. 25, No. 2, P. 190–201. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-2-190-201.

Обеспечение долговечности и надежности контактных колец токосъемных устройств при работе в упруго-пластическом состоянии

А. А. Гришин

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52
E-mail: grishinaa@iss-reshetnev.ru

Надежность работы кольцевых токосъемных устройств в течение заданного срока службы играет определяющую роль в работе систем электропитания различной техники и во многом зависит от прочности и надежности всех его компонентов, в частности, контактных колец. Одной из важнейших характеристик кольцевых токосъемных устройств является сопротивление контакта, уменьшение которого осуществляют путем применения цветных и драгоценных материалов, обладающих низким сопротивлением, с одновременным увеличением прижимной силы между кольцами токосъемника. Такой подход приводит к резкому росту напряжений в контактном кольце, которые могут достигать и даже превышать предел текучести материала, циклически изменяясь по кольцу в процессе вращения кольца с последующим усталостным разрушением.

Однако работоспособность контактных колец в таких тяжелых условиях вполне можно обеспечить в случае малых скоростей движения и небольшого числа циклов нагружения за счет использования области малоциклового усталости на кривой Веллера. Для этого в данной работе предложены методы аналитического расчета напряженно-деформированного состояния кольца токосъемного устройства, которые позволяют определить уровень действующих напряжений в материале и по кривой Веллера определить допустимое число циклов нагружения и коэффициент запаса по усталости. Также предложен метод расчета надежности кольца, который позволяет оценивать вероятность безотказной работы и разрушения.

По предложенным методикам выполнены расчеты колец токосъемного устройства, применяемого в космических аппаратах типа «Экспресс», которые показали работоспособность методик и позволили обеспечить требуемый срок службы контактных колец и их надежность. Предложенная аналитическая формулировка методик позволяет решать как проверочные, так и проекторочные расчеты колец в зависимости от поставленной задачи.

Ключевые слова: кольцевое токосъемное устройство, контактное кольцо, прочность, пластичность, малоцикловая усталость, надежность, вероятность безотказной работы.

Ensuring durability and reliability of contact rings of current collection devices when working in elastic-plastic state

A. A. Grishin

JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”
52, Lenin St., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation
E-mail: grishinaa@iss-reshetnev.ru

The reliability of ring current-collecting devices during a given service life plays a decisive role in the operation of power supply systems of various equipment and largely depends on the strength and reliability of all its components, in particular, contact rings. One of the most important characteristics of ring current collectors is the contact resistance, which is reduced by using non-ferrous and precious materials with low resistance, while increasing the downforce between the rings of the current collector. With an increase in the compression force F of the contact ring, the resistance of the contacts decreases to a certain minimum value and practically does not decrease with further growth of the force. The dependence of the contact resistance on the compression force has the form of a power function, the coefficients of which are determined experimentally.

However, the operability of the contact rings in such severe conditions can be ensured in the case of low speeds and a small number of loading cycles by using the low-cycle fatigue area on the Weller curve. Having determined the coefficients of the equation of the inclined section on the Weller curve in the area of low-cycle fatigue, it is possible to determine the number of permissible loading cycles at a given stress level or solve the inverse problem of determining the permissible stress level if the number of loading cycles is known. To substantiate the correctness of the selected compressive force and the corresponding stresses, methods for calculating the fatigue margin coefficient, as well as a method for calculating the reliability of the ring material, are proposed. Reliability is estimated by the Gauss curve and is numerically expressed in the form of the probability of failure-free operation and the probability of failure, for which the corresponding theoretical dependencies are obtained.

According to the proposed methods, calculations of the rings of the current-collection device used in EXPRESS-type spacecraft were performed, which showed the operability of the methods and allowed to ensure the required service life of the contact rings and their reliability. A very simple analytical formulation of the methods allows us to solve both verification and design calculations of rings, depending on the task at hand.

Keywords: ring current collector, contact ring, strength, plasticity, low cycle fatigue, reliability, probability of trouble-free operation.

Введение

Кольцевые токосъемные устройства служат для передачи электрической энергии от вращающихся частей к неподвижному основанию в различной технике, например, во вращающихся солнечных батареях, поворотных платформах башен и т. д. [1–5]. Обеспечение требуемой надежности работы кольцевого токосъемного устройства в течение заданного срока службы во многом зависит от условий работы его элементов, в частности, контактных колец. Основными характеристиками кольцевого токосъемного устройства являются электрические параметры контакта, в первую очередь его сопротивление. Самыми действенными мерами по улучшению проводимости является использование в качестве материала контактных колец цветных и драгоценных материалов (медь, серебро, золото и др.), которые обладают хорошими электрическими характеристиками, а также увеличение прижимной силы до получения минимального сопротивления контакта [4–18]. Однако подобные материалы весьма податливы и имеют малые значения пределов текучести, поэтому такой подход приводит к быстрому росту напряжений в контактном кольце, которые могут превысить предел текучести его материала даже при относительно небольших прижимных силах. Ситуация усугубляется для ответственных конструкций, таких как космические аппараты связи, которые должны работать в автономном режиме в течение длительного времени на орбите (10–12 лет и более).

Вместе с тем, если требуемое число циклов нагружения контактных колец относительно невелико, то пластическое нагружение их материала вполне возможно за счет использования области малоциклового усталости на кривой Веллера. Для этого в данной работе предложены методы аналитического расчета напряженно-деформированного состояния кольца токосъемного устройства, которые позволяют определить уровень действующих напряжений и обеспечить требуемый ресурс колец с заданной вероятностью безотказной работы. Корректность предложенного подхода обеспечивается использованием известных положений теории усталости и теории надежности при расчете механических систем.

1. Постановка задачи

Работа конструкции кольцевого токосъемного устройства (рис. 1) заключается в передаче электрической энергии сжатыми контактными кольцами 3, расположенными между наружным 1 и внутренним 2 кольцами. Поскольку нами рассматривается весьма сильное сжатие контактных колец, то на рис. 1 они показаны в деформированном состоянии. Изоляторы 4 служат сепараторами и обеспечивают равномерное расположение контактных колец по окружности.

Для обеспечения электрического контакта между внутренним и наружным токосъемными кольцами в кольцевом токосъемном устройстве контактное кольцо при установке подвергается сжатию на заданную величину деформационного нагружения Δ , которое в расчетной схеме заменим эквивалентным силовым нагружением в виде силы F (рис. 2, а).

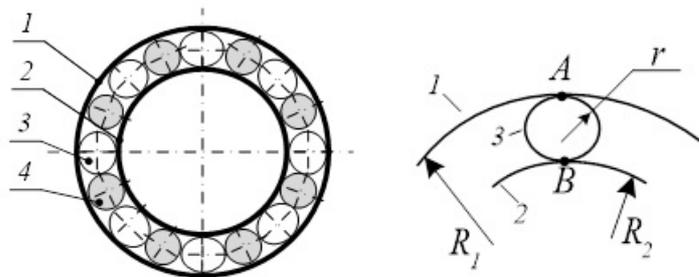


Рис. 1. Конструкция кольцевого токосъемного устройства:
1 – наружное токосъемное кольцо; 2 – внутреннее токосъемное кольцо;
3 – ролик-изолятор; 4 – контактное кольцо

Fig. 1. Design of the ring current collector:
1 – external current-collection ring; 2 – internal current-collection ring;
3 – insulator roller; 4 – contact ring

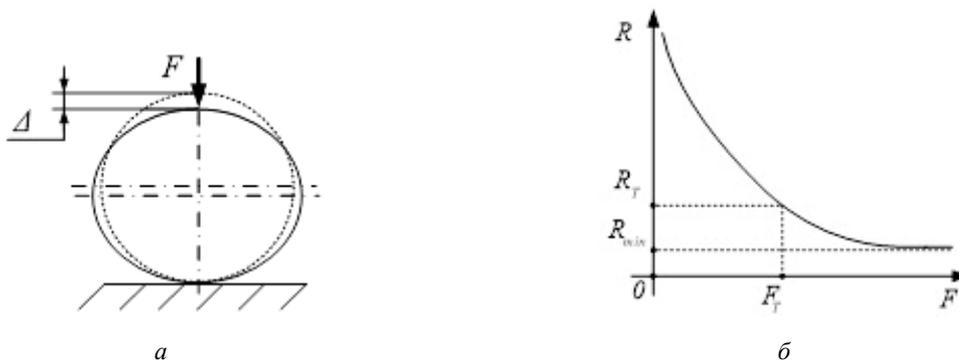


Рис. 2. Нагружение контактного кольца:
а – деформационное и эквивалентное силовое нагружение (сжатие силой F);
б – зависимость сопротивления контактов R от силы сжатия F

Fig. 2. Loading of the contact ring:
а – deformation and equivalent force loading (compression by force F);
б – the dependence of the contact resistance R on the compression force F

С ростом силы F сжатия контактного кольца сопротивление контактов уменьшается до некоторого минимально возможного значения R_{\min} (рис. 2, б) и практически не снижается при дальнейшем росте силы. Зависимость сопротивления контактов от силы сжатия имеет нелинейный вид, определяемый по эмпирической формуле [8–10]:

$$R_K = k \cdot F^{-m},$$

где m и k – справочные постоянные, получаемые эмпирическим путем.

При использовании чистых металлов, таких как медь, серебро, золото и др., предел текучести материала контактного кольца может быть достигнут при значении сжимающей силы F_T , при котором сопротивление контактов R_T значительно больше минимально достижимой величины R_{\min} . Дальнейшее повышение силы сжатия контактного кольца может привести к нарушению условий его прочности, поэтому необходимо разработать методы оценки его работоспособности в условиях пластичности.

Будем считать скорость вращения токосъемных колец настолько малой, что можно пренебречь инерциальными эффектами и использовать для расчета статическую постановку задачи [1]. Это справедливо, например, для кольцевого токосъемного устройства солнечных батарей космических аппаратов, скорость вращения которого порядка 10^{-4} об/мин. Геометрия поперечного сечения контактных колец имеет прямоугольную форму (ширина b и толщина t), размеры которой значительно меньше длины их окружности, что позволяет использовать для расчета теорию стержней [19]. Вследствие симметрии конструкции (рис. 1) условия нагружения всех контактных колец одинаковы, и достаточно рассмотреть напряженное состояние одного кольца.

Для описания поведения материала кольца из цветных и драгоценных материалов под нагрузкой примем модель идеального упруго-пластического материала. В этом случае оценка состояния материала сводится к проверке достижения значения максимальных нормальных напряжений величины его предела текучести.

2. Усталостная задача

При сжатии контактного кольца в нем возникает комплекс силовых факторов и соответствующих им напряжений. Проведенные предварительные исследования [1] показали, что контактные кольца работают в условиях поперечного изгиба от силы F и определяющим в их напряженном состоянии являются изгибные нормальные напряжения.

2.1. Максимальные изгибные напряжения контактных колец

Нормальные напряжения $\sigma_{M_{\max}}$ от изгиба контактных колец в результате их сжатия силой F (рис. 2, а) определяются, согласно зависимости [19; 20], как

$$\sigma_{M_{\max}} = \frac{M(\varphi)}{W_z} = \frac{Fr}{\pi \cdot W_z}, \quad (1)$$

где $M = Fr \left(\frac{1}{\pi} - \frac{1}{2} \sin \varphi \right)$ – изгибающий момент как функция угла положения контактного кольца; F – сжимающая сила, эквивалентная деформации на величину Δ , определяется как

$$F = \Delta \cdot \frac{2EJS}{r^3 S \left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{4} - \frac{2}{\pi} \right) + rJ \left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{4} \right)}; \quad (2)$$

$J = bt^3 / 12$ – момент инерции поперечного сечения кольца; $W_z = bt^2 / 6$ – момент сопротивления поперечного сечения кольца; Δ – деформация кольца; E – модуль Юнга; r – средний радиус кольца; S – площадь поперечного сечения кольца.

Условием перехода материала контактного кольца в пластическое состояние, согласно принятой расчетной схеме, является условие

$$\sigma_{M_{\max}} \geq \sigma_T. \tag{3}$$

Полученные зависимости (2)–(3) позволяют определять значение деформации сжатия контактного кольца, при котором его материал будет переходить в состояние пластичности. Условие (3) при этом не является условием прочности, поскольку предполагается работа контактного кольца в пластическом состоянии. В данном случае необходимо обеспечить усталостную прочность, что рассматривается далее.

2.2. Усталостная прочность контактных колец

В процессе функционирования токосъемного устройства каждое его контактное кольцо непрерывно перекачивается по поверхностям наружного и внутреннего колец (рис. 1), поэтому каждая точка кольца подвергается воздействию переменных напряжений (1) которые циклически изменяются во времени от нуля до предела текучести материала с соответствующим знаком (рис. 3).

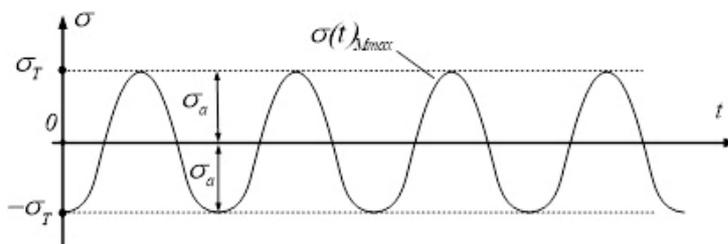


Рис. 3. Симметричный цикл нагружения контактного кольца

Fig. 3. Symmetrical loading cycle of the contact ring

При циклическом нагружении прочность материала оценивается по коэффициенту запаса по усталостной прочности на основе кривой усталости Веллера [21; 22], определяющей зависимость предела выносливости материала от числа циклов нагружения (рис. 4).

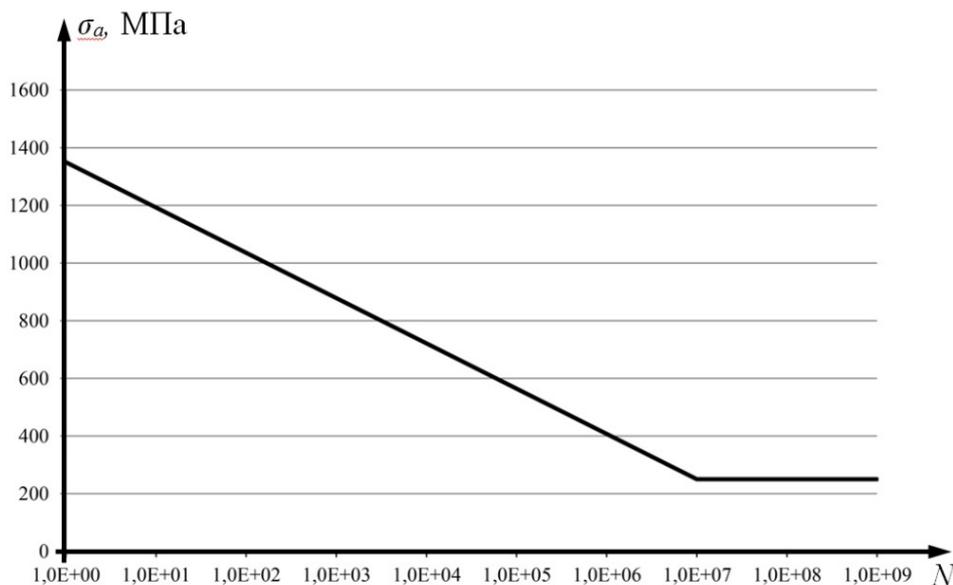


Рис. 4. Пример кривой Веллера в логарифмической шкале

Fig. 4. Example of the Weller curve on a logarithmic scale

Согласно кривой Веллера, обеспечить возможность работы материала контактных колец в условиях текучести возможно при числе циклов нагружения, значительно меньших обычного предела усталости ($N = 10^7$). Этому условию соответствуют тихоходные токосъемные устройства, используемые, например, в составе космических аппаратов типа «Экспресс», для которых контактные кольца в течение всего жизненного цикла подвергаются порядка $\sim 10^4 - 10^5$ циклам нагружения. Данным значениям на кривой Веллера соответствует область малоциклового усталости, при которой допускаемые напряжения будут значительно больше предела выносливости, достигая предела текучести материала.

Уравнение наклонного участка малоциклового усталости в логарифмической шкале имеет вид [23; 24]

$$\sigma_a + K \cdot \lg N = \sigma_{-1}(N) + K \cdot \lg N_0, \quad (4)$$

где σ_{-1} – предел выносливости материала для заданного числа циклов нагружения N ; σ_a – амплитуда переменного напряжения и соответствующее ему число циклов нагружения N (при $N = 1$ получаем $\sigma_a = \sigma_B$); σ_B – предел прочности материала контактного кольца; K – коэффициент, определяющий угол наклона прямой линии усталости в логарифмических координатах в зависимости от физико-механических характеристик материала рассчитываемых деталей и их размеров:

$$K = \frac{\sigma_a - \sigma_{-1}}{\lg N_0 - \lg N}.$$

Тогда можно определить предел выносливости для заданного числа циклов нагружения N по обратной к (4) зависимости:

$$\sigma_{-1}(N) = \sigma_a + K \cdot (\lg N - K \cdot \lg N_0). \quad (5)$$

Полученное значение (5) можно считать пределом выносливости при малоциклового усталости, для которого $\sigma_{-1}(N) = \sigma_T$, т. е. материал контактного кольца будет работать в условиях пластического нагружения.

2.3. Расчет на усталостную прочность контактного кольца

За основу расчетов на усталостную прочность контактного кольца взяты значения изгибных напряжений в его наиболее опасной точке, в которой изгибные напряжения изменяются по циклической зависимости. Минимальное и максимальное значения изгибающих моментов определяется по зависимостям

$$M_{\min}(\varphi) = -Fr \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \right), \quad M_{\max}(\varphi) = \frac{Fr}{\pi}, \quad (6)$$

которым соответствуют напряжения

$$\sigma_{\min} = -\frac{F \cdot r}{W_z} \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \right), \quad \sigma_{\max} = \frac{F \cdot r}{\pi \cdot W_z}. \quad (7)$$

Среднее напряжение за цикл нагружения составит:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}. \quad (8)$$

Амплитуда напряжения:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}. \quad (9)$$

Используя результаты расчетов по формулам (6)–(9), получим коэффициент запаса по усталостной прочности для контактного кольца равным:

$$n = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a \frac{K_\sigma}{K_d \beta_\sigma} + \psi_\sigma \sigma_m}, \quad (10)$$

где σ_{-1} – предел выносливости; K_σ – эффективный коэффициент концентрации напряжений,

$$K_\sigma = \frac{\sigma_{\max.\text{эфф}}}{\sigma_H} = 1 + q_\sigma (\alpha_\sigma - 1),$$

где q_σ – коэффициент чувствительности материала к концентрациям напряжений; α_σ – коэффициент концентрации напряжений:

$$\alpha_\sigma = \frac{\sigma_{\max.}}{\sigma_H};$$

K_d – коэффициент влияния абсолютных размеров поперечного сечения:

$$K_d = \frac{(\sigma_{-1})_d}{\sigma_{-1}},$$

где $(\sigma_{-1})_d$ – предел выносливости гладких образцов диаметром d ; σ_{-1} – предел выносливости для стандартных образцов;

β_σ – коэффициент состояния поверхности детали:

$$\beta_\sigma = \frac{(\sigma_{-1K})_Д}{(\sigma_{-1K})_d},$$

где $(\sigma_{-1K})_Д$ – предел выносливости натурной детали;

ψ_σ – коэффициент чувствительности к асимметрии цикла.

Фактический ресурс работы контактного кольца, исходя из известных значений амплитуд переменных напряжений и теоретического значения коэффициента запаса по усталостной прочности, теоретически можно определить по зависимости

$$N_{\text{факт}} = 10^{\frac{\sigma_{-1}(N)}{K} + \lg N_0 - \sigma_a N}, \quad (11)$$

где $\sigma_{-1}(N)$ – предел выносливости при малоцикловой усталости, определяемый по формуле (5).

2.4. Надежность контактных колец

Надежность контактных колец в пластическом состоянии определим вероятностью его безотказной работы [25–28]. Условием разрушения является превышение максимальных напряжений в контактом кольце значения предела выносливости материала данного кольца:

$$\sigma_{\max} = \sigma_{M_{\max}} > \sigma_{-1}(N).$$

Введем функцию неразрушения в виде разности

$$\Delta\sigma = \sigma_{-1}(N) - \sigma_{\max}.$$

Рассматриваем σ_{\max} и $\sigma_{-1}(N)$ как случайные величины и считаем, что их значения имеют нормальное распределение, для которого известны статистические параметры:

1) средние значения

$$\bar{\sigma}_{\max} \text{ и } \bar{\sigma}_{-1};$$

2) среднее квадратическое отклонение

$$S_{\Delta\sigma} = \sqrt{S_{\sigma_{-1}}^2 + S_{\sigma_{\max}}^2}.$$

Тогда вероятность разрушения соответствует вероятности выполнения условия

$$P_{\text{разр}} = P(\Delta\sigma) = P \quad (\text{при } \Delta\sigma < 0) = F(0),$$

а вероятность безотказной работы равна

$$P_{\text{без}} = 1 - P_{\text{разр}}. \quad (12)$$

Здесь функция $P(\Delta\sigma)$ – функция распределения случайной величины $\Delta\sigma$:

$$P(\Delta\sigma) = \frac{1}{2} + \Phi\left(\frac{\Delta\sigma - \Delta\bar{\sigma}}{S_{\Delta\sigma}}\right),$$

где $\Phi(x)$ – функция Лапласа:

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{u^2}{2}} du.$$

Обозначим

$$v_{\Delta\sigma} = \frac{S_{\Delta\sigma}}{\Delta\sigma} = \frac{\sqrt{S_{\sigma_{-1}}^2 + S_{\sigma_{\max}}^2}}{\sigma_{-1} - \sigma_{\max}}.$$

Используя приближенное представление функции Лапласа [25], выражение для вероятности разрушения примет вид степенного ряда:

$$P_{\text{разр}} = \frac{v_{\Delta\sigma}}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\left(\frac{1}{2v_{\Delta\sigma}^2}\right)} \cdot (1 - v_{\Delta\sigma}^2 + 3v_{\Delta\sigma}^4 - v_{\Delta\sigma}^6 + \dots). \quad (13)$$

После подстановки значений в выражение (12) и ограничившись членами ряда до 6-й степени включительно, получим значения вероятности разрушения (13) и безотказной работы (12) контактного кольца.

3. Пример расчета контактных колец

По полученным зависимостям выполним расчеты долговечности и вероятности безотказной работы для контактных колец токосъемного устройства космического аппарата типа «Экспресс». Для этого примем следующие исходные данные: $R_1 = 30$ мм, $R_2 = 25$ мм, $r = 9,9$ мм, $S = 0,36$ мм², $\Delta = 0,4$ мм. Материал: бронзовый сплав БрБ2, $\sigma_{-1} = 591$ МПа.

Расчет силовых факторов по зависимостям (2)–(4) дает значения $W = 6,25 \cdot 10^{-9}$ м³, $J = 1,56 \cdot 10^{-11}$ м⁴, $F = 5$ Н, $M_{\max} = 0,008$ Н·м. Используя эти значения, получаем результаты расчета контактного кольца на усталостную прочность, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчета на усталостную прочность контактного кольца

Натяг кольца Δ , мм	σ_{\min} , МПа	σ_{\max} , МПа	σ_m , МПа	σ_a , МПа	σ_{-1} , МПа	K_σ	K_d	β_σ	ψ_σ	n
0,4	-303	532	114,4	418	591	1,22	1	1,1	0,1	1,24

Результаты расчета вероятности разрушения и безотказной работы контактного кольца приведены в табл. 2.

Результаты расчета вероятности безотказной работы контактного кольца

Натяг кольца Δ , мм	Экв. сила F , Н	σ_{-1} , МПа	σ_{\max} , МПа	$\Delta\sigma$, МПа	$\bar{\sigma}_{\max}$, МПа	$\bar{\sigma}_{-1}$, МПа	$S_{\Delta\sigma}$	$\nu_{\Delta\sigma}$	$P_{\text{разр}}$	$P_{\text{без}}$
0,4	5	591	418	62	418	591	48	0,229	$6,77 \cdot 10^{-6}$	0,999 99

Полученные значения коэффициента запаса на усталостную прочность $n = 1,24$ и вероятности безотказной работы $P_{\text{без}} = 0,999\ 99$ соответствуют требованиям, предъявляемым к конструкции токосъемников космических аппаратов типа «Экспресс».

4. Обсуждение результатов

Предложенные в работе методы расчета контактных колец на усталость и вероятность безотказной работы основаны на допущениях классической теории стержней, что вносит некоторую погрешность в расчеты. Например, в расчетах радиус кольца r остается постоянным, хотя при сжатии кольцо переходит в эллипс, у которого один фокальный радиус будет несколько меньше исходной величины радиуса. Это приведет к некоторому росту фактических значений изгибных напряжений. Дополнительно росту напряжений способствовал бы учет напряжений от поперечной и продольных сил, для комплексной оценки которых уже потребуется использовать одну из теорий прочности. Однако проведенные расчеты показали, что учет этих факторов приведет к изменению результатов всего на 2–3 %, что позволяет оставаться в рамках классической теории и простых аналитических зависимостей.

Проведенные эксперименты показали, что более существенный рост предела выносливости материала происходит с уменьшением размеров контактного кольца, шероховатости его поверхности и скругления кромок для уменьшения возможной концентрации напряжения вблизи геометрических неоднородностей. Аналитическое описание этих зависимостей и способы их учета в инженерных расчетах в настоящее время до конца еще не получены. Оценить их влияние можно лишь косвенно, например, по соотношению размеров стандартных образцов и исследуемых деталей (колец). Стандартные образцы на усталость имеют круглое сечение диаметром порядка 7–10 мм. Толщина контактных колец составляет всего 0,25 мм, что на порядок меньше стандартного значения и предполагает значительное увеличение действительного ресурса работы контактного кольца (11) по сравнению с теоретически рассчитанным значением.

На выносливость контактного кольца также оказывает влияние температура [28]. Анализируя результаты исследований по влиянию температуры на предел выносливости бронзовых сплавов, установлено, что при понижении температуры значения предела выносливости несколько увеличиваются, а при повышении сначала постепенно, а затем все более быстро уменьшается. При этом до температуры $+100^\circ$ этими изменениями в практических расчетах можно пренебречь из-за незначительности их эффекта.

Возможность термоусталости материала контактного кольца не рассматривалась, поскольку при малоцикловом нагружении она начинает проявляться при температурах от 30° при наличии зон больших градиентов температур и резкого изменения напряжений. В случае тонкостенных контактных колец, согласно полученным исходным данным от АО «РЕШЕТНЁВ», возникают перепады температур менее 20° , что не повлияет ни на структуру материала кольца, ни на его механические свойства. Скорость изменения температуры колец от -30° до $+80^\circ$ за сутки является очень малой, что и приводит практически к равномерному температурному полю токосъемного устройства.

Коэффициенты температурного расширения материалов контактного внешнего и внутреннего колец, согласно имеющимся справочным данным, идентичны в широком диапазоне температур. Это приводит к одинаковой относительной деформации всех колец, составляющих

токоусъемный узел. Условия закрепления и работы контактных колец таковы, что нагрев начинается с внешнего кольца и значения температур падают вблизи внутреннего кольца. Следовательно, возникающие градиенты приведут к большему расширению внешнего кольца по сравнению с внутренним, что приведет к уменьшению натяга и, таким образом, снижению амплитудных значений переменных напряжений. Абсолютные значения температурной деформации колец зависят от значения коэффициентов температурного расширения их материала и составляют примерно в 1000 раз меньшие величины натяга, поэтому воздействием температурных напряжений на прочность и усталость контактных колец можно пренебречь.

Заключение

В работе предложены методики аналитического расчета напряженно-деформированного состояния контактных колец при работе кольцевых токоусъемных устройств космических аппаратов. Методики основаны на известных положениях теории усталости и теории надежности, которые позволяют обеспечить требуемую усталостную прочность и надежность контактных колец, работающих в условиях пластичности в течение заданного срока службы или числа циклов нагружения.

Методика может быть использована для обоснования принятия конструкторско-технологических решений при проектировании новых или проверке существующих кольцевых токоусъемных устройств. Простая формулировка методик позволяет решать как проверочные, так и проектировочные расчеты колец в зависимости от поставленной задачи и аналитически определять практически любой расчетный параметр.

Библиографические ссылки

1. Гришин А. А., Кудрявцев И. В. Обеспечение прочности контактных колец токоусъемных устройств космических аппаратов // Космонавтика и ракетостроение. 2018. № 3(102). С. 81–91.
2. Разработка и внедрение в промышленное производство унифицированной высокоэнергетической космической платформы «Экспресс-2000» и создание на ее базе современных, конкурентоспособных космических аппаратов связи и телекоммуникаций / В. Е. Косенко, А. Н. Акимов, Ю. Г. Выгонский и др. ; АО «ИСС». 2015. 100 с.
3. Гришин А. А., Смирнов Н. А., Харитонов А. И. Анализ конструкции кольцевых токоусъемных устройств // Вестник СибГАУ. 2014. № 5 (57). С. 146–153.
4. Гришин А. А. Потери на токоусъемных устройствах при передаче электрической энергии от солнечных батарей на космический аппарат // Труды МАИ. 2017. № 97. С. 6.
5. Holmberg K. Tribological contact analysis of a rigid ball sliding on a hard coated surface. Part I: Modelling stresses and strains // Surf. Coat. Tech. 2006. Vol. 200. P. 3793–3809.
6. Драгунов Ю. Б., Зубченко А. С., Каширский Ю. В. Марочник сталей и сплавов. М. : Машиностроение, 2014. 1216 с.
7. Основы теории электрических аппаратов / под общ. ред. И. С. Таева. М. : Высшая школа, 1987. 352 с.
8. Электрический справочник в 3-х т. Т. 2. Электротехнические устройства / под общ. ред. проф. МЭИ В. Г. Герасимова. М. : Энергоиздат, 1981. 640 с.
9. Демкин Н. Б. Качество поверхности и контакт деталей машин. М. : Машиностроение, 1981. 244 с.
10. Комаров А. А. Электрические контакты. Самара : СамИИТ, 2001. 51 с.
11. Кацман М. М. Электрические машины. М. : Академия, 2017. 496 с.
12. Бойченко В. И. Контактные соединения токоведущих шин. Л. : Энергия, 1978. 144 с.
13. Мерл В. Электрические контакты. М. – Л. : Госэнергоиздат, 1962. 80 с.
14. Бредихин А. Н. Электрические контактные соединения. М. : Энергия, 1980. 168 с.
15. Домкин Н. Б. Контактное шероховатых поверхностей. М. : Наука, 1970. 227 с.
16. Шлыков Ю. П. Контактное и термическое сопротивление. М. : Энергия, 1977. 328 с.

17. Ким Е. И., Омельченко В. Г., Харин С. Н. Математические модели процессов в электрических контактах. Алма-Ата : Наука, 1977. 236 с.
18. Усов В. В. Металловедение электрических контактов. М.-Л. : Госэнергоиздат, 1963. 208 с.
19. Феодосьев В. И. Сопротивление материалов. 10-е изд. М. : МГТУ, 1999. 592 с
20. Биргер И. А., Шорр Б. Ф., Иосилевич Г. Б. Расчет на прочность деталей машин. М. : Машиностроение, 1993. 640 с.
21. Хейвуд Р. Б. Проектирование с учетом усталости. М. : Машиностроение, 1982, 490 с.
22. Трошенко В. Т. Прочность металлов при переменных нагрузках. Киев : Наук. думка, 1978. 176 с.
23. Головин С. А., Пушкар А., Левин Д. М. Упругие и демпфирующие свойства конструкционных металлических материалов. М. : Metallurgia, 1987. 190 с.
24. Терентьев В. Ф., Кораблева С. А. Усталость металлов. М. : Наука. 2015. 479 с.
25. Зарубин В. С., Крищенко А. П. Теория вероятностей. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 456 с.
26. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М. : Высшая школа, 2001. 575 с.
27. Дульнев Р. А. Термическая усталость материалов. М. : Машиностроение, 1980, 200 с.
28. Залесский А. М. Тепловые расчёты электрических контактов. Л. : Энергия, 1967. 380 с.

References

1. Grishin A. A., Kudrjavcev I. V. [Ensuring the strength of the contact rings of current-removing devices of spacecraft]. *Kosmonavtika i raketostroenie*. 2018, Vol. 102, No. 3, P. 81–91 (In Russ.).
2. Kosenko V. E. Akimov A. N., Vygotsky Yu. G. *Razrabotka i vnedrenie v promyshlennoe proizvodstvo unifikatsionnoy vysokoenergeticheskoy kosmicheskoy platformy "Ekspress-2000" i sozdanie na ee baze sovremennykh, konkurentosposobnykh kosmicheskikh apparatov svyazi i telekommunikatsiy* [Development and introduction into industrial production of the unified high-energy space platform Express-2000 and the creation of modern, competitive communication and telecommunications spacecraft on its basis]. Zheleznogorsk, JSC ISS., 2015, 100 p.
3. Grishin A. A., Smirnov N. A., Kharitonov A. I. [Analysis of the design of ring current-removing devices]. *Vestnik SibGAU*. 2014, Vol. 57, No. 5, P. 146–153 (In Russ.).
4. Grishin A. A. [Losses on current-carrying devices during the transmission of electric energy from solar panels to a spacecraft]. *Trudy MAI*. 2017. No. 97 (In Russ.). Available at: https://mai.ru/upload/iblock/240/Grishin_Strugavets_rus.pdf (accessed: 01.06.2024).
5. Holmberg K. Tribological contact analysis of a rigid ball sliding on a hard coated surface. Part I: Modelling stresses and strains. *Surf. Coat. Tech.*, 2006, Vol. 200, P. 3793–3809.
6. Dragunov Yu. B., Zubchenko A. S., Kashirsky Yu. V. *Marochnik staley i splavov* [Marochnik of steels and alloys]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2014, 1216 p.
7. Taev I. S. *Osnovy teorii elektricheskikh apparatov* [Fundamentals of the theory of electrical devices]. Moscow, Higher School Publ., 1987, 352 p.
8. Gerasimov V. G. *Elektricheskiy spravochnik v 3-kh t. T. 2. Elektrotekhnicheskie ustroystva* [Electrical reference book in 3 volumes. Vol. 2. Electrical devices]. Moscow, Energoizdat Publ., 1981, 640 p.
9. Demkin N. B. *Kachestvo poverkhnosti i kontakt detaley mashin* [Surface quality and contact of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981, 244 p.
10. Komarov A. A. *Elektricheskie kontakty* [Electrical contacts]. Samara, SamIIT Publ., 2001, 51 p.
11. Katsman M. M. *Elektricheskie mashiny* [Electric machines]. Moscow, Akademiya Publ., 2017, 496 p.
12. Boychenko V. I. *Kontaktnye soedineniya tokovedushchikh shin* [Contact connections of current-carrying bus]. Leningrad, Energiya Publ., 1978, 144 p.
13. Merl V. *Elektricheskie kontakty* [Electrical contacts]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1962, 80 p.
14. Bredikhin A. N. *Elektricheskie kontaktnye soedineniya* [Electrical contact connections]. Moscow, Energiya Publ., 1980, 168 p.

15. Demkin N. B. *Kontaktirovanie sherokhovatykh poverkhnostey* [Contacting rough surfaces]. Moscow, Nauka Publ., 1970, 227 p.
16. Shlykov Yu. P. *Kontaktnoe i termicheskoe soprotivlenie* [Contact and thermal resistance]. Moscow, Energiya Publ., 1977, 328 p.
17. Kim E. I., Omelchenko V. G., Kharin S. N. *Matematicheskie modeli protsessov v elektricheskikh kontaktakh* [Mathematical models of processes in electrical contacts]. Alma-Ata, Nauka Publ., 1977, 236 p.
18. Usov V. V. *Metallovedenie elektricheskikh kontaktov* [Metallology of electrical contacts]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1963, 208 p.
19. Feodosiev V. I. *Soprotivlenie materialov* [Resistance of materials]. Moscow, MSTU Publ., 1999, 592 p.
20. Birger I. A., Shorr B. F., Iosilevich G. B. *Raschet na prochnost' detaley mashin* [Calculation of the strength of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1993, 640 p.
21. Heywood R. B. *Proektirovanie s uchetom ustalosti* [Fatigue-based design]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982, 490 p.
22. Troshchenko V. T. *Prochnost' metallov pri peremennykh nagruzkakh* [Strength of metals under variable loads]. Kiev, Nauk. Dumka Publ., 1978, 176 p.
23. Golovin S. A., Pushkar A., Levin D. M. *Uprugie i dempfiroyushchie svoystva konstruktivnykh metallicheskih materialov* [Elastic and damping properties of structural metal materials]. Moscow, Metallurgy Publ., 1987, 190 p.
24. Terentyev V. F., Korableva S. A. *Ustalost' metallov* [Fatigue of metals]. Moscow, Nauka Publ., 2015, 479 p.
25. Zarubin B. C., Krishchenko A. P. *Teoriya veroyatnostey* [Probability theory]. Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ., 2004, 456 p.
26. Wentzel E. S. *Teoriya veroyatnostey* [Probability theory]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2001, 575 p.
27. Dulnev R. A. *Termicheskaya ustalost' materialov* [Thermal fatigue of materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980, 200 p.
28. Zalessky A. M. *Teplovye raschety elektricheskikh kontaktov* [Thermal calculations of electrical contacts]. Leningrad, Energiya Publ., 1967. 380 p.

© Гришин А. А., 2024

Гришин Антон Александрович – заместитель главного технолога по приборному производству; АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: grishinaa@iss-reshetnev.ru.

Grishin Anton Alexandrovich – Deputy Chief Technologist for Instrument Manufacturing; JSC “Academician Reshetnev “Information Satellite Systems”. E-mail: grishinaa@iss-reshetnev.ru.
