УДК 621.923

# ОБОСНОВАНИЕ СВЯЗИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТООТРАЖАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ШТАНГ С ОТВЕРСТИЯМИ С ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ

Новиков Ф.В., докт. техн. наук, Шкурупий В.Г.
*(г. Харьков, Украина)*

*В статье приведена оценка условий работы штанги с отверстиями под воздействием потока падающей энергии*

Известно [1], что работоспособность поверхностей тонких упругих лент штанг в условиях воздействия светового потока в значительной степени определяется их геометрическими и физико-химическими характеристиками. Уменьшить температуру нагрева деталей, работающих в условиях воздействия светового потока, можно за счет технологического обеспечения заданных геометрических и оптических характеристик поверхностей, применяя для этого эффективные методы механической и физико-технической обработки. Однако, в настоящее время отсутствуют практические рекомендации по технологическому обеспечению геометрических и оптических характеристик поверхностей труднообрабатываемых особотонкостенных деталей.

Для обоснования влияния геометрических характеристик поверхностей штанг на температурный перепад освещенной и теневой стороны, приводящий к их изгибу, сделаем следующие допущения [1]:

– нагрев штанги происходит за счёт теплового потока, идущего от излучателя;

– толщина стенок весьма мала в сравнении с расстоянием между ними (диаметр сечения $2{,}4 \cdot 10^{-2}$ м), температура не меняется по толщине стенок;

– зазор в месте перехлёста кромок штанги мал, его величина приблизительно равна толщине стенки сечения. Лучистый теплообмен между поверхностями в этой области происходит по закону для двух бесконечных параллельных плоскостей. Среднюю линию сечения можно с достаточной степенью точности считать окружностью с постоянным радиусом;

– распределение температуры в сечениях штанги по длине одинаково. Влияние природы материала и концов стенок не учитываем;

– физические величины $\lambda$, $c$ и $\rho$ (коэффициент теплопроводности, теплоёмкости и плотности материала штанги) будем считать постоянными и независимыми от координат и температуры (материал однороден и температурный интервал сравнительно невелик).

Ввиду симметричности сечения, достаточно рассмотреть направление теплового потока при изменении угла $\theta$ от 0 до $\pi$ и угла $\alpha$ от 0 до $\frac{\pi}{2}$ (рис.1).

Очевидно, что $max(T_2 - T_1)$ будет при $\theta = \frac{\pi}{2}$ и $\alpha = \frac{\pi}{2}$.

Необходимо, решить следующую задачу: оценить максимальную разность температур и свести её к минимальной:

$$\max_{\theta,\alpha}(T_2 - T_1) \to min\ . \tag{1}$$

Как известно [1], нестационарное температурное поле будет описываться одномерным уравнением теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2}, \tag{2}$$

где $T$ – текущая температура в произвольной точке; $\tau$ − время течения процесса; $\theta$ − текущая координата; $\alpha = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$ − коэффициент температуропроводности материала стенки штанги.

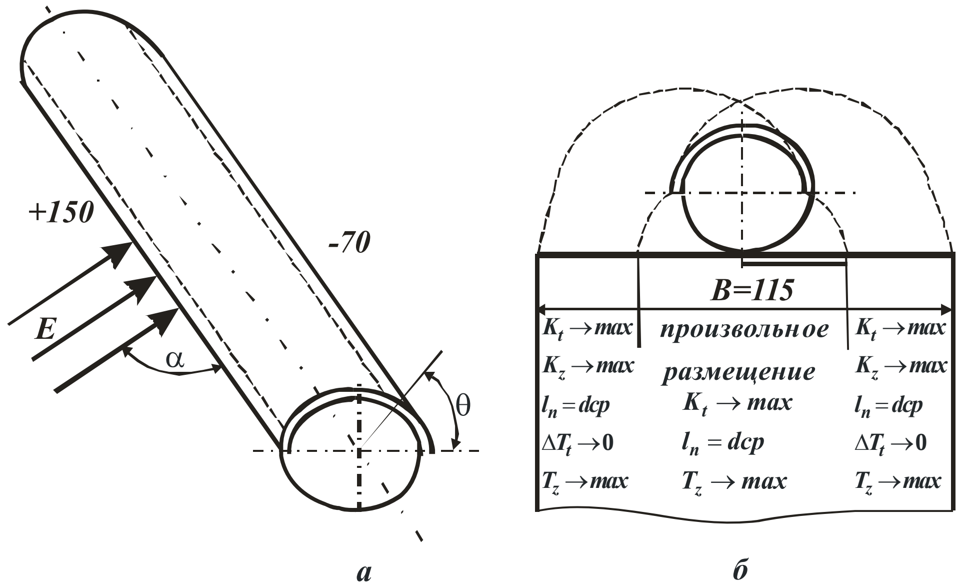


Рис. 1. Направление светового потока (а) и развертка сечения (б) штанги с условиями размещения отверстий.

Применительно к сечению штанги интенсивность теплового потока внутри материала стенки можно представить в следующем виде [2]:

$$q_1 = \frac{4\lambda t}{D^2} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2}. \tag{3}$$

Интенсивность теплового потока на поверхности штанги:

$$q_2 = Eпад \cdot As \cdot \frac{F_N}{F_ш} \cdot cos\,\alpha = Eпад \cdot As \cdot \frac{F_N}{F_Г} \cdot F \cdot cos\,\alpha, \tag{4}$$

где $F_N = D \cdot \Delta\ell$, $F_\Gamma = \dfrac{\pi D}{2}\Delta\ell$ - проекция облучаемой поверхности на плоскость, нормальную к падающему излучению и облучаемая гладкая поверхность соответственно.

В начальной точке интенсивность тепловых потоков будет равна, т.е. $q_1 = q_2$:

$$\frac{2}{\pi} \cdot F \cdot Enad \cdot As \cdot cos\,\alpha = \frac{4\lambda t}{D^2} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2}. \tag{5}$$

Из уравнения (5) следует, что, изменяя шероховатость поверхности, можно в определённой степени изменять температуру на поверхности штанги (левая часть уравнения). На эффект передачи части поглощаемой энергии на противоположную сторону сечения штанги можно также воздействовать изменением размеров диаметра *D* и толщины материала *t* штанги, а также путём выбора материала (правая часть уравнения).

Таким образом, интенсивность изменения температуры (в пространственных координатах) зависит от геометрических размеров сечения штанги, шероховатости поверхности и природы материала:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} = \frac{D^2 \cdot F}{2\pi\lambda t} \cdot Enad \cdot As \cdot cos\,\alpha\ . \tag{6}$$

По интенсивности изменения температуры можно оценить максимальный температурный дифференциал:

$$\left.\frac{\partial T}{\partial \theta}\right|_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{3\pi}{2}} = \frac{D^2 F}{2\lambda t} \cdot Enad \cdot As \cdot cos\,\alpha\ . \tag{7}$$

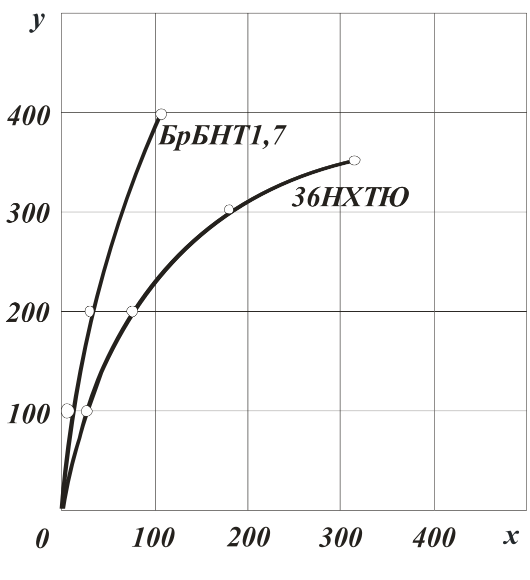


Рис. 2. Зависимость прогиба штанги от ее длины для штанг из сплава марки: 1 – БрБНТ 1,7; 2 – 36НХТЮ.

При значении фактора шероховатости $F = 0{,}5$ уравнение (7) согласуется с данными, приведенными в работе [5].

Деформация изгиба штанги под воздействием теплового потока в этой работе апроксимируется следующим уравнением:

$$x = \frac{D}{\Delta T \alpha_\ell} \ell n\ cos \frac{\Delta T \alpha_\ell}{D} y\ , \tag{8}$$

где $\alpha_\ell$ - коэффициент теплового линейного расширения.

На рис. 2 представлена зависимость изгиба штанги $x$ от её длины $y$. Расчет выполнен по уравнению (8).

Следует отметить, что изгиб штанг из ленты сплава марки БрБНТ 1,7 значительно меньше. В значительной степени величина изгиба зависит от поглощательной способности поверхности и других теплофизических величин материала $\lambda$ и $\alpha_\ell$.

Для расчёта теплового изгиба использованы следующие значения входящих в формулу теплофизических величин [4]:

– БрБНТI, 7 $\lambda = 200$ Вт/м·град; $\alpha_\ell = 15{,}8 \cdot 10^{-6}$ 1/град;

– 36НХТЮ $\lambda = 35$ Вт/м·град; $\alpha_\ell = 9{,}8 \cdot 10^{-6}$ 1/град;

$D = 0{,}024$ м; $t = 0{,}00015$ м; $Eпад = 1550$ Вт/м$^2$; $\alpha = 0$.

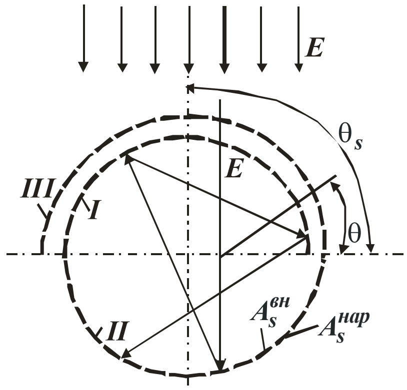


Рис. 3. Схема перераспределения лучистого потока $E$ по сечению штанги с отверстиями.

Рассмотрим поведение трубчатого элемента штанги с отверстиями.

Сечение штанги можно рассматривать как сечение, состоящее из трёх участков (рис. 3.), находящихся в различных условиях теплообмена I $(0 < \theta < \pi)$, II $(\pi < \theta < 2\pi)$ и III $(0 \le \theta \le \pi)$.

Для каждого участка найдём уравнение, связывающее температуры $T_I$, $T_{II}$ и $T_{III}$ при значениях $\theta = \dfrac{\pi}{2}$ и $\dfrac{3}{2}\pi$ (худшие случаи воздействия теплового потока). Эти уравнения можно получить из условия теплового баланса трёх участков сечения стержня.

Тепловой баланс на стенке можно представить в виде уравнения [3]:

$$As \cdot E \cdot S_N = \varepsilon \cdot C_o \cdot S \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4,$$

где $As$ − коэффициент поглощения лучистой энергии поверхностью стенки; $E$ – плотность падающего солнечного лучистого потока, Вт/м$^2$; $S_N$ − проекция облучаемой поверхности стенки на плоскость, нормальную к падающему излучению, м$^2$; $\varepsilon$ – коэффициент излучения поверхности стенки (степень черноты); $C_o$ – постоянная Стефана-Больцмана 5,67 Вт/м$^2$·К$^4$; $S$ – излучаемая поверхность стенки, м$^2$; $T$ – температура стенки.

Анализ уравнения показывает, что отношение доли поглощения к излучению поверхностей будет зависеть от шероховатости излучаемой поверхности, площадь которой должна быть значительно больше, чем площадь воспринимающей падающий лучистый поток поверхности.

$$\frac{A_s}{\varepsilon} = \frac{C_o}{E} \cdot \frac{S}{S_N} \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4.$$

Это отношение прямо пропорционально отношению общей площади излучения $S$ к площади проекции облучаемой поверхности $S_N$. С увеличением шероховатости поверхности площадь излучения будет увеличиваться, а температура должна уменьшаться. Следует заметить, что при переизлучении падающего потока внутри сечения штанги необходимо различать шероховатость и оптические свойства наружной и внутренней поверхности штанги: $A_s^{нар}$; $A_s^{вн}$; $\varepsilon^{нар}$ и $\varepsilon^{вн}$.

Рассмотрим тепловой баланс на стенках I-I, II-II и III-III при $\theta_S = \pi/2$.

При установившемся состоянии равновесия количество лучистой энергии, поглощённое стенкой I-I и III-III, и количество энергии, излучаемое этими стенками в пространство, между собой равны:

$$A^{нар} \cdot E_{пад} \cdot \left(S_N^{общ} - S_N^{отв} \cdot K_3\right) + A^{вн} \cdot E_{переизл}^{II-I} \cdot \left(S_{общ} - S_{отв} \cdot K_3\right) =$$

$$\xi_{нор} \cdot C_o \cdot \left(S_{общ} - S_{общ} \cdot K_3\right) \cdot \left(\frac{T_{III}}{100}\right)^4 + K_o \xi_{вн} \cdot C_o \left(S_{общ} - S_{отв} \cdot K_3\right) \cdot \left(\frac{T_I}{100}\right)^4 + \quad (9)$$

$$+ \xi_{пр}\left[\left(\frac{T_{III}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_I}{100}\right)^4\right] \cdot C_o \cdot \left[S_{общ} - S_{отв}\left(3 - 2K_3\right)\right]$$

где $K_o$ – коэффициент, учитывающий отраженные тепловые потоки; $K_1 = \frac{S_{отв}}{S_{общ} - S_{отв}}$ − коэффициент, учитывающий общую проходную для лучей площадь отверстий по сечению штанги; $K_2 = \frac{S_{ппп}}{S_{отв}}$ − коэффициент, учитывающий площадь перекрытия потока лучей по отношению к площади отверстий, пропускающих поток лучей; $K_3 = \frac{S_N^{отв} - S_N^{ппп}}{S_N^{отв}}$ − коэффициент, учитывающий несовпадение отверстий в месте перехлёста, может изменяться в пределах $(0 \le K_3 \le 1)$; $S_N^{ппп}$ − площадь перекрытий перемычек внутренней кромки отверстиями наружной; $S_N^{общ}$ − проекция общей поверхности облучения на плоскость, нормальную к падающему излучению; $S_N^{отв}$ − проекция площади отверстий на наружной кромке сечения.

Обозначим отношение $\frac{T_I}{T_{III}} = a$ − коэффициент теплопередачи излучением через зазор. Тогда (9) можно преобразовать к виду:

$$A^{нар} \cdot E_{пад}\left(S_N^{общ} - S_N^{отв} \cdot K_3^N\right) + A^{вн} \cdot E_{переизл}^{II-I}\left(S_{общ} - S_{отв} \cdot K_3\right) =$$

$$\{\ \xi^{нар} \cdot C_o\left(S_{общ} - S_{отв} \cdot K_3\right) + K_o \xi_{вн} C_o\left(S_{общ} - S_{отв} \cdot K_3\right) a^4 + \quad (10)$$

$$+ \frac{1}{\frac{1}{\xi^{нар}} + \frac{1}{\xi^{вн}} - 1} \cdot C_o \cdot \left[S_{общ} - S_{отв}\left(3 - 2K_3\right)\right]\left(1 - a^4\right)\ \}\left(\frac{T_{III}}{100}\right)^4.$$

Температуру стенки III-III можно представить уравнением:

$$T_{III} = 100 \sqrt[4]{\frac{A_{нар} \cdot E_{пад}\left(S_N^{общ} - S_N^{отв} \cdot K_3^N\right) + A_{вн} \cdot E_{переизл}^{II-I}\left(S_{общ} - S_{отв} K_3\right)}{\xi^{нар} \cdot C_o\left(S_{общ} - S_{отв} K_3\right) + K_o \xi_{вн} C_o\left(S_{общ} - S_{отв} K_3\right) a^4 +}}$$

$$\left.\overline{\overline{\qquad + \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{нар}} + \frac{1}{\varepsilon_{вн}} - 1} \cdot C_o \cdot [S_{общ} - S_{отв}(3 - 2K_3)] \cdot (1 - a^4)}}\right. . \qquad (11)$$

Тепловой баланс для стенки II-II:

$$A_{вн} \cdot E_{пад} \cdot S_N^{отв} \cdot K_2^N \cdot K_3^N + A_{вн} \cdot E^{I-II}{}_{переизл}(S_{общ} - S_{отв}) =$$
$$= K_o \cdot \varepsilon_{вн} \cdot C_o \cdot (S_{общ} - S_{отв}) \cdot \left(\frac{T_{II}}{100}\right)^4 + \xi_{нар} C_o (S_{общ} - S_{отв}) \left(\frac{T_{II}}{100}\right)^4 . \qquad (12)$$

Температуру стенки II-II можно представить уравнением:

$$T_{II} = 100 \sqrt[4]{\frac{A_{вн} \cdot E_{пад} \cdot S_N^{отв} \cdot K_2^N \cdot K_3^N + A_{вн} \cdot E^{I-II}_{переизл}(S_{общ} - S_{отв})}{K_o \cdot \xi_{вн} \cdot C_o (S_{общ} - S_{отв}) + \xi_{нар} C_o (S_{общ} - S_{отв})}} . \qquad (13)$$

Используя соотношения (11) и (13), получим:

$$\frac{A_{нар}}{A_{вн}} \cdot \frac{\left(S_N^{общ} - S_N^{отв} \cdot K_3^N\right) + \frac{E^{II-I}_{переизл}}{E_{пад}}\left(S_{общ} - S_{отв} \cdot K_3\right)}{S_N^{отв} \cdot K_2^N \cdot K_3^N + \frac{E^{I-II}_{переизл}}{E_{пад}}\left(S_{общ} - S_{отв}\right)} =$$
$$= \frac{\xi_{нар} \cdot C_o (S_{общ} - S_{отв} K_3) + K_o \xi_{вн} C_o (S_{общ} - S_{отв} \cdot K_3) a^4}{\xi_{нар} \cdot C_o (S_{общ} - S_{отв}) + K_o \xi_{вн} (S_{общ} - S_{отв}) \cdot C_o} + \qquad (14)$$
$$+ \frac{1}{\frac{1}{\xi_{нар}} + \frac{1}{\xi_{вн}} - 1} C_o [S_{общ} - S_{отв}(3 - 2K_3)](1 - a^4).$$

После преобразований и сокращений, уравнение (14) примет вид:

$$\frac{\frac{A_{нар}}{A_{вн}} + \frac{K_E}{Fs_1}}{K_I^N \cdot K_2^N \cdot K_3^N + \frac{K_E}{Fs_2}} = \frac{1 + K_o \cdot \frac{\xi_{вн}}{\xi_{нар}} a^4 + \frac{1}{1 + \frac{\xi_{нар}}{\xi_{вн}} - \xi_{нар}} \cdot F_{S \cdot Фп}(1 - a^4)}{F_{S \cdot п} + K_o \cdot \frac{\xi_{вн}}{\xi_{нар}} \cdot F_{S \cdot п}} , \qquad (15)$$

где $Fs_I = \frac{S^N_{общ} - S^N_{отв} K_3^N}{S_{общ} - S_{отв} K_3}$ – фактор, учитывающий эффективную нормальную площадь поверхности внутри сечения стержня на участке перекрытия; $Fs_2 = \frac{S^N_{общ} - S^N_{отв} \cdot K_3^N}{S_{общ} - S_{отв}}$ – фактор, учитывающий эффективную нормальную площадь поверхности внутри сечения стержня на участке без перекрытия;

$K_E = \dfrac{E_{переизл}}{E_{пад}}$ – коэффициент, учитывающий долю лучистого потока внутри сечения стержня; $F_{sn} = \dfrac{S_{общ} - S_{отв}}{S_{общ} - S_{отв} \cdot K_3}$ – фактор, учитывающий эффективную полную площадь перемычек на наружной стороне по отношению к перекрытию кромок в месте перехлёста; $F_{SФФ} = \dfrac{S_{общ} - S_{отв}(3 - 2K_3)}{S_{общ} - S_{отв} \cdot K_3}$ – фактор, учитывающий эффективную полную площадь перекрытия перемычек на фронтальной и теневой стороне сечения по отношению к площади перекрытия перемычек в области перехлёста.

Обозначим правую часть уравнения (15) через параметр $B$. Тогда уравнение (15) примет вид:

$$\frac{A_{нар}}{A_{вн}} = B\left(K_I^N \cdot K_2^N \cdot K_3^N + \frac{K_E}{Fs_{II}}\right) - \frac{K_E}{Fs_I}. \qquad (16)$$

Анализируя зависимость (16), можно заключить, что отношение поглощательной способности наружной поверхности к внутренней будет зависеть от многих факторов: от коэффициентов использования площади развертки и в целом сечения; от условий перекрытия кромок отверстий в месте перехлёста, между фронтальным и теневым участком сечения; от эффективной доставки доли падающего излучения на теневую сторону сечения; от соотношения коэффициентов излучения внутренней и наружной поверхности штанги.

При условии отсутствия перекрытия перемычек отверстиями в области перехлёста и, если внешняя и внутренняя сторона в местах перехлёста в зазоре обладает одной и той же излучательной способностью, выражение упростится:

$$\frac{As_{нар}}{As_{вн}} = K_1^N \cdot K_2^N,$$

так как $\dfrac{\xi_{вн}}{\xi_{нар}} \to 1$; $\alpha \to 1$, $F_{sфф} \to 1$, $F_{sn} \to 1$,

то $K_3 \to 1$; $Fs_I \to Fs_{II}$.

И параметр $B$ принимает значение, равное 1. Или

$$\frac{As_{нар}}{As_{вн}} = K_1^N \cdot K_2^N = \frac{S_N^{ппп}}{S_N^{общ} - S_N^{отв}}, \qquad (17)$$

т.е. отношение коэффициентов поглощения наружной к внутренней поверхности сечения прямо пропорционально доле площади перекрытой поверхности перемычек на теневой стороне по отношению к общей площади перемычек на фронтальной стороне сечения.

При условии полного перекрытия поверхности перемычек теневой стороны отверстиями фронтальной стороны $K_2^N \to 1$, тогда уравнение (17) можно представить в виде:

$$\frac{As^{нар}}{As_{вн}} = \frac{1}{F_{нар}} \cdot \frac{S_{отв}}{S_{общ} - S_{отв}}, \tag{18}$$

где $F$ – фактор шероховатости на наружной поверхности.

Лучшим условием работы штанги будет восприятие энергии падающего излучения при значении угла падения $\theta_s = \frac{3}{2}\pi$.

Рассуждая аналогичным образом, получим уравнение связи между соотношением коэффициентов поглощения $\frac{A_S^{нар}}{A_S^{вн}}$ и геометрическими факторами $F$, $K_I^N$ и $K_2^N$:

$$\frac{A_S^{нар}}{A_s^{вн}} = \frac{F_{вн}}{F_{нар}} \cdot K_1 \cdot K_2. \tag{19}$$

Приведенные выше рассуждения показывают, что при определенной системе отверстий можно добиться того, чтобы отношение теплового потока, попадающего на освещенную сторону штанги, к тепловому потоку, попадающему на затененную сторону, оставалось постоянным при различных ориентациях штанги по отношению к солнечным лучам.

При заданных размещениях отверстий по развертке штанги и ее материале, выбор параметров, обеспечивающих уменьшение температурных деформаций штанги под действием солнечной радиации, касается только выбора коэффициентов поглощения по отношению к солнечным лучам для наружной стороны штанги $A_s^{нар}$ и ее внутренней стороны $A_s^{вн}$.

Список литературы:

1. Попов В.И. Системы ориентации и стабилизации космических аппаратов. − М. Машиностроение, 1986. − 184 с.

2. Григорьев Л.Я., Маньковский О.Н. Инженерные задачи нестационарного теплообмена. − Л.: Изд. «Энергия», 1968. − 72 с.

3. Боли Б., Уэйнер Дж. Теория температурных напряжений. − М.: Изд. «Мир». − 258 с.

4. Прецизионные сплавы с особыми свойствами упругости и теплового расширения. − М.: Изд. «Стандарты», 1972.

5. Kemper A., Farrell K. Temperature Gradients and Distortion De Havilland Technical Note, 1962, XII, №164.