

## ГЛАВА II. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАГРЕВАТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА (ФЕНА) ДЛЯ ШТАМПА ГОРЯЧЕЙ ШТАМПОВКИ ЛЕНТОЧНОГО КАРДАННОГО ПОДВЕСА АКСЕЛЕРОМЕТРА

Конструктивно нагревательный элемент (НЭ) выполнен в виде цилиндрической спирали из ленты нихрома марки Х20Н80-Н ГОСТ 12766.2-77 толщиной  $h_{л} = 0,25$  мм, гофрированной по двум ортогональным направлениям оболочки (ГО) с глубиной волн гофр в продольном направлении  $H_{пр} = 0,6$  мм, длиной волны гофр  $l_{пр} = 2$  мм, длиной дуги волны гофр  $S_{пр} = \kappa_{1п} \cdot l_{пр} = 2,36$  мм ( $\kappa_{1п} = 1,18$  – коэффициент анизотропии ГО в поперечном направлении и

$$\kappa_{2np} = \frac{3}{2} \left( \frac{H_{np}}{h_2} \right)^2 + 1 = 12; \quad h_2 - \text{средняя толщина ГО с глубиной волн гофр в}$$

поперечном направлении  $H_{п} = 1$  мм, длиной волны гофр  $l_{п} = 4$  мм, длиной дуги волны гофр  $S_{п} = \kappa_{1п} \cdot l_{п} = 4,48$  мм ( $\kappa_{1п} = 1,12$  – коэффициент анизотропии ГО в

продольном направлении и  $\kappa_{2n} = \frac{3}{2} \left( \frac{H_n}{h_2} \right)^2 + 1 = 32$  – коэффициент анизотропии ГО в поперечном направлении [1].

Приведенные значения модулей упругости эквивалентных по жесткостям на растяжение и изгиб плоских оболочек по продольной и поперечной осям будут соответственно равны [1]:

$$E_{np.p} = \frac{E}{\kappa_{2n}}; \quad E_{n.p.} = \frac{E}{\kappa_{2np}}; \quad (2.1)$$

$$E_{np.u} = \kappa_{2np} \cdot E; \quad E_{n.u} = \kappa_{2n} \cdot E, \quad (2.2)$$

где  $E$  – модуль упругости материала НЭ.

Уменьшение модулей упругости на растяжение по двум ортогональным осям  $E_{np.p}$  и  $E_{п.р}$  ГО приводит к уменьшению температурных напряжений в местах соединения оболочки с каркасом НЭ, выполненного из материала с другим температурным коэффициентом линейного расширения по сравнению с материалом НЭ. В то же время приведенные значения модулей упругости ГО на изгиб по сравнению с плоской пластиной той же толщины  $h_2$ ,  $E_{np.u}$  и  $E_{п.u}$  увеличатся в 12 и 32 раза соответственно, что уменьшает температурный прогиб НЭ по двум ортогональным осям и позволит поднять допустимую температуру для НЭ заданной толщины на 150 - 250°С по сравнению с допустимым значением температуры для материала НЭ, например, для сплава Х20Н80-Н – 950...1200°С.

Для уменьшения коррозии материала НЭ при высоких температурах на поверхность НЭ следует нанести жаростойкое покрытие, например, хромовое с добавлением в электролит мельчайших алмазных частиц с размерами 40...60 ангстрем, температура плавления которых  $t_{пл.а} = 3500$ °С, температура плавления хрома  $t_{пл.хр} = 1900$ °С, которые обладают высокой теплопроводностью [2].

Другим способом нанесения жаростойкого покрытия, например, керамического с содержанием оксида алюминия 90-96%, рабочая температура которого  $t_{рmax} = 1600$ °С, предел прочности на растяжение  $\sigma_{вр} = 70...190$  МПа, теп-

лопроводность  $\lambda = 12 \dots 25$  Вт/м °С является холодный газодинамический метод, который позволяет формировать на различных подложках как любые металлические, так и неметаллические композиционные покрытия, например, из карбидов, боридов, оксидов, силицидов и других тугоплавких соединений [3].

Для дальнейшего увеличения рабочей температуры инертных газов, проходящих через фен, в качестве материала НЭ можно использовать молибденовую или вольфрамовую ленту толщиной  $h=0,05 \dots 0,3$  мм, гофрированную по двум ортогональным направлениям с покрытием, полученным путем силицирования в порошковой смеси, жаростойкость которого  $1600 \dots 1700^\circ\text{C}$  [4].

Проведем сравнительный анализ эффективности теплообмена НЭ, выполненного в виде цилиндрической спирали из плоской полоски шириной  $b_{\text{нэ}}=2$  мм, намотанной на каркас НЭ, длиной  $L_{\text{нэ}}=1340$  мм с расстоянием между наружной поверхностью НЭ и внутренней поверхностью каркаса фена  $\delta=1$  мм и НЭ той же ширины и длины, выполненного из ГО с параметрами волн гофр, приведенными ранее.

Выберем расчетную схему для плоского НЭ в виде плоской щели, эквивалентный диаметр для которой  $d_{\text{щ}}=2\delta=2$  мм, а число Нусселя  $Nu_{\text{щ}}=4,86$  [5].

При течении теплоносителя (газа) между двумя неограниченными пластинами при одностороннем обогреве и температуре НЭ  $t_{\text{нэ}}=\text{const}=1300^\circ\text{C}$  среднее значение коэффициента теплопередачи НЭ – газ  $\alpha_{\text{в}}$  и температуре воздуха на входе в фен  $t_{\text{во}}=20^\circ\text{C}$ , коэффициенте теплопроводности воздуха при средней температуре  $t_{\text{вр}}=0,5(t_{\text{нэ}}+t_{\text{во}})=660^\circ\text{C}$   $\lambda_{\text{вр}}=6,5 \cdot 10^{-2}$  Вт/м °С равно [5]

$$\alpha_{\text{вщ}} = \frac{Nu_{\text{щ}} \lambda_{\text{вр}}}{d_{\text{щ}}} = 158 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}} \quad (2.3)$$

При двустороннем обогреве воздуха в щели поверхность теплообмена  $F_{\text{птщ}}$  с учетом того, что наружная поверхность каркаса НЭ также будет иметь температуру, близкую к  $t_{\text{нэ}}$ , а температура внутренней поверхности корпуса фена в силу малого значения  $\delta$  и передачи тепла от НЭ к внутренней поверхности корпуса фена излучением будет близка к  $t_{\text{нэ}}$  и будет в первом приближении равна

$$F_{\text{птщ}}=2 \cdot 1,5 b_{\text{нэ}} L_{\text{нэ}}=8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Удельная мощность теплопередачи НЭ –воздух  $P_{\text{уд.щ}}$  равна

$$P_{\text{уд.щ}}=\alpha_{\text{вщ}} F_{\text{птщ}}=1,26 \text{ Вт/}^\circ\text{C}$$

Максимальная мощность теплопередачи НЭ –воздух при  $t_{\text{нэ}}=1300^\circ\text{C}$  и средней температуре воздуха  $t_{\text{в.ср}}=1200^\circ\text{C}$  составит

$$P_{\text{нэщ}}=P_{\text{уд.щ}}(t_{\text{нэ}}-t_{\text{в.ср}})=126 \text{ Вт}$$

Для определения теплоотдачи НЭ, выполненного из гофрированной по двум ортогональным направлениям оболочки с шириной НЭ  $b=2$  мм, длиной  $L=1340$  мм с приведенными выше параметрами волн гофр с глубинами  $H_{\text{пр}}=0,6$  мм и  $H_{\text{п}}=1$  мм, длинами волн гофр  $l_{\text{пр}}=2$  мм и  $l_{\text{п}}=4$  мм, расстоянием между стенками кольцевого канала для теплоносителя, в котором размещен НЭ  $a=1,9$  мм, можно воспользоваться эквивалентной схемой обтекания теплоносителем шахматного пучка с двумя рядами труб с эквивалентным диаметром труб  $d_{\text{этр.}}=0,35$  мм, расстоянием между трубами в горизонтальной

плоскости  $S_1=2$  мм,  $l_{тр}=4$  мм и расстоянием между смежными рядами труб  $S_2 = 0,55$  мм с близкой по конфигурации схемой распределения потока на одном шаге гофра  $S_1$ .

Для случая ламинарного потока воздуха и предела изменения параметров шахматного пучка труб

$$\frac{S_1}{d_{э.мп}} \leq 1,25 ; \quad \frac{S_2}{d_{э.мп}} \leq 1,25 \quad \text{и значение числа Рейнольдса } Re_B,$$

удовлетворяющего соотношению  $10 < Re_e < 200$  справедлива следующая формула [5]

$$Nu_B = 1,8 Re_B^{0,33} \cdot Pr_B^{0,33} (Pr_B / Pr_c)^{0,25}, \quad (2,4)$$

где  $Pr_B=0,705$  и  $Pr_c=0,725$  - число Прандтля при температуре набегающего потока воздуха  $t_{в0}=20^\circ\text{C}$  и число Прандтля для воздуха при температуре стенки  $t_c=1300^\circ\text{C}$  соответственно.

Число Рейнольдса для потока воздуха определяется по формуле

$$Re_e = \frac{V_{в.маx} \cdot d_{э.мп}}{v_{вp}}, \quad (2.5)$$

где  $V_{в.маx}$  - скорость газа в узком сечении, м/с;  $v_{вp}=1,51 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с - кинематическая вязкость воздуха при температуре воздуха  $t_{в0}=20^\circ\text{C}$ .

Задаваясь максимальным значением мощности теплового потока фена  $P_{маx}=200$  Вт, определим расход воздуха, приведенного к нормальным условиям и средней удельной теплоемкости воздуха  $C_{в.ср}=1,115 \cdot 10^3$  Дж/кг<sup>0</sup>С и рабочей температуре воздуха в фене  $t_{вp}=1200^\circ\text{C}$

$$q_{в0} = \frac{P_{маx}}{C_{в.ср} (t_{вp} - t_{в0})} = 1,52 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^3}{\text{с}}. \quad (2.6)$$

Максимальное значение скорости воздуха  $V_{в.маx}$  в узком сечении канала теплообменника фена с площадью  $F_{в.мин}=1,8 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup> равно

$$V_{в.маx} = \frac{q_{в0}}{F_{в.мин}} = 8,4 \text{ м / с}. \quad (2.7)$$

Подставляя значения параметров в формулу (2.5), получим значение числа Рейнольдса  $Re_B = 195$ , которое удовлетворяет условию  $Re_B < 200$ .

Введем в формулу (2.4) поправочный коэффициент  $\epsilon_s$ , учитывающий невыполнение условий для соотношений параметров  $\frac{S_1}{d_{э.мп}}$  и  $\frac{S_2}{d_{э.мп}}$ , который

принят для случая обтекания теплоносителем шахматного пучка труб при  $Re_B > 10^3$  и  $S_1/S_2=7,3 \geq 2$ , равным  $\epsilon_s=1,12$ .

$$Nu_B = 1,8 Re_B^{0,33} \cdot Pr_B^{0,33} (Pr_B / Pr_c)^{0,25} \epsilon_s = 10,1 \quad (2.8)$$

Среднее значение коэффициента теплоотдачи НЭ -воздух  $\alpha_B$  при коэффициенте теплопроводности воздуха при температуре  $t_B=20^\circ\text{C}$   $\lambda_{в0}=2,6 \cdot 10^{-2}$  Вт/м<sup>0</sup>С равно

$$\alpha_{в2} = Nu_e \cdot \frac{\lambda_{в0}}{d_{э.мп}} = 753 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{С}}. \quad (2.9)$$

Поверхность теплообмена ленточного гофрированного НЭ шириной  $b_{\text{нэ}} = S_{\text{пр}} = 2,36$  мм, длиной  $L_{\text{нэ}} = 1340$  мм с учетом того, что температура наружной поверхности каркаса НЭ и внутренней поверхности корпуса НЭ будут близкими к температуре НЭ за счет передачи тепла от последнего излучением будет равна

$$F_{\text{пт.г}} = 4 \cdot 1,5 b_{\text{нэ}} \cdot L_{\text{нэ}} = 1,6 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2.$$

Удельную мощность теплоотдачи НЭ – воздух можно определить по следующему соотношению

$$P_{\text{уд. вг}} = \alpha_{\text{в.г}} \cdot F_{\text{пт.г}} = 12 \text{ Вт/}^\circ\text{С}.$$

Максимальная мощность теплоотдачи НЭ – воздух при  $t_{\text{нэ}} = 1300^\circ\text{С}$  и средней температуре воздуха  $t_{\text{в ср}} = 1200^\circ\text{С}$  составит

$$P_{\text{нэ.г}} = P_{\text{уд. вг}} \cdot (t_{\text{нэ}} - t_{\text{в ср}}) = 1200 \text{ Вт}$$

Из приведенного анализа видно, что максимальная мощность теплоотдачи НЭ – воздух для гофрированного ленточного НЭ, выполненного по патенту РФ №220080 на порядок больше, чем известного ленточного спирального нагревателя при тех же его габаритах и массе.

Определим потери теплоты через двухслойную стенку фена с воздушной прослойкой по формуле [5]

$$Q_n = \frac{t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}}{\frac{1}{\alpha_{\text{вн}} F_{\text{вн}}} + \frac{\delta_{\text{к}}}{\lambda_{\text{к}} F_{\text{рк}}} + \frac{\delta_{\text{в}}}{\lambda_{\text{в}} F_{\text{рв}}} + \frac{\delta_{\text{э}}}{\lambda_{\text{э}} F_{\text{рэ}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{нар}} F_{\text{нар}}}}, \quad (2.10)$$

где  $t_{\text{вн}}$ ,  $t_{\text{нар}}$  – температуры сред, омывающих внутреннюю и наружную поверхности фена;  $\alpha_{\text{вн}}$ ,  $\alpha_{\text{нар}}$  – средние коэффициенты теплоотдачи на внутренней и наружной поверхностях фена;  $F_{\text{вн}}$ ,  $F_{\text{нар}}$  – площади внутренней и наружной поверхности фена;  $\delta_{\text{к}}$ ,  $\delta_{\text{в}}$ ,  $\delta_{\text{э}}$  – толщина корпуса НЭ, воздушной прослойки и теплового экрана;  $\lambda_{\text{к}}$ ,  $\lambda_{\text{в}}$ ,  $\lambda_{\text{э}}$  – средние коэффициенты теплопроводности материалов корпуса, воздуха и теплового экрана;  $F_{\text{рк}}$ ,  $F_{\text{рв}}$ ,  $F_{\text{рэ}}$  – площади расчетных поверхностей корпуса НЭ, воздушной прослойки и теплового экрана соответственно, равные при  $F_{\text{рк}} = 0,5(F_{\text{вн}} + F_{\text{нк}})$ ;  $F_{\text{рв}} = 0,5(F_{\text{нк}} + F_{\text{вн.э}})$ ;  $F_{\text{рэ}} = 0,5(F_{\text{вн.э}} + F_{\text{нэ}})$  при  $F_{i+1} / F_i < 2$ .

Принимаем температуру среды, омывающей внутреннюю поверхность НЭ  $t_{\text{вн}} = 1200^\circ\text{С}$ , температуру среды, омывающей наружную поверхность фена  $t_{\text{нар}} = 20^\circ\text{С}$ .

Для определения коэффициента теплоотдачи внутренней поверхности корпуса фена  $\alpha_{\text{вн}} = \alpha_{\text{изг}} + \alpha_{\text{конв}}$  для газообразной внутренней среды (воздуха) рекомендуется выражение [5]:

$$\alpha_{\text{вн.в}} = \frac{4,54 \left[ (T_{\text{вн}} / 100)^4 - (T_{\text{см}} / 100)^4 \right]}{t_{\text{вн}} - t_{\text{см}}} + 2,56 \sqrt{t_{\text{вн}} - t_{\text{см}}} = 555 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{С}}, \quad (2.11)$$

где  $t_{\text{см}} = 1150^\circ\text{С}$  – температура внутренней поверхности корпуса НЭ.

Коэффициент теплоотдачи наружной поверхности фена для воздуха  $\alpha_{\text{нар.в}}$  определим из табл. 6.3 [5] при температуре окружающего воздуха  $t_{\text{в}} = 20^\circ\text{С}$  и  $t_{\text{нар}} = 180^\circ\text{С}$ ,  $\alpha_{\text{нар}} = 19 \text{ Вт/м}^2 \text{ } ^\circ\text{С}$ .

Площади внутренних и внешних поверхностей корпуса прослойки и теплового экрана фена и их средние толщины  $\delta_{\text{к}} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ,  $\delta_{\text{в}} = 10^{-2} \text{ м}$ ,  $\delta_{\text{э}}$

$=5 \cdot 10^{-3}$  м выбраны исходя из конструкции фена:  $F_{вн} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ ;  $F_{нк} = 5,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ ;  $F_{вн.э} = 11,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ ;  $F_{н.э} = 14 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ .

Расчетные значения площадей корпуса НЭ  $F_{рк} = 5,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ , воздушной прослойки  $F_{рв} = 8,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$  и теплового экрана  $F_{рэ} = 12,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ , средние значения коэффициентов теплопроводности для материалов элементов конструкции фена приняты: для корпуса НЭ  $\lambda_{к} = 18 \text{ Вт/м}^{\circ}\text{С}$  (керамика УФ-61  $t_{p \text{ max}} = 1600^{\circ}\text{С}$ ), для воздушной прослойки  $\lambda_{в.ср} = 7,15 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/м}^{\circ}\text{С}$  и для теплового экрана  $\lambda_{э.ср} = 0,092 \text{ Вт/м}^{\circ}\text{С}$  (перлит на фосфатной связке ПФ-350,  $t_{p \text{ max}} = 1150^{\circ}\text{С}$ ). Для более высоких температур можно использовать дианас легковес, максимальная рабочая температура для которого  $t_{p \text{ max}} = 1550^{\circ}\text{С}$ , коэффициент теплопроводности  $\lambda_{q} = 0,547 + 0,3 \cdot 10^{-3} t_{ср}$ .

Подставляя значения параметров в формулу (2.4), найдем величину потерь теплоты через двухслойную стенку фена с воздушной прослойкой  $Q = 47,6 \text{ Вт}$ .

Расчет по формуле (2.10) ведется методом последовательных приближений:

1. Задаемся температурой наружной поверхности теплового экрана фена  $t_{н.э} = 180^{\circ}\text{С}$ ; принимаем ориентировочные значения температурных перепадов и соответствующие им средние температуры всех слоев, средняя температура воздушной прослойки  $t_{в.ср} = 780^{\circ}\text{С}$ , средняя температура теплового экрана  $t_{э.ср} = 280^{\circ}\text{С}$ .

2. Определяем тепловые потери  $Q = 47,6 \text{ Вт}$ .

Проверяем значения температур на границе слоев по выражениям:

$$t_{вн.к} = t_{вн} - \frac{Q}{\alpha_{вн} F_{вн}} = 1163^{\circ}\text{С};$$

$$t_{н.к} = t_{вн.к} - \frac{Q \cdot \delta_{к}}{\lambda_{к.ср} \cdot F_{рк}} = 1162^{\circ}\text{С};$$

$$t_{в} = t_{н.к} - \frac{Q \cdot \delta_{в}}{\lambda_{в.ср} \cdot F_{рв}} = 386^{\circ}\text{С};$$

$$t_{э} = t_{в} - \frac{Q \cdot \delta_{э}}{\lambda_{э.ср} \cdot F_{рэ}} = 179^{\circ}\text{С};$$

$$t_{нар} = t_{э} - \frac{1}{\alpha_{нар} \cdot F_{нар}} = 2^{\circ}\text{С}.$$

Принятое значение температуры наружного воздуха  $t_{нар} = 20^{\circ}\text{С}$ .

Погрешность расчета температур различных слоев фена составляет  $18^{\circ}\text{С}$ , что вполне допустимо для температур отдельных слоев конструкции фена, достигающих  $1180^{\circ}\text{С}$ .

Для повышения надежности и срока службы штампа для горячей штамповки ленточного гофрированного карданного подвеса в качестве газообразного теплоносителя необходимо использовать инертный газ – азот с избыточным давлением в ресивере порядка  $100 \text{ Па}$ .

## Литература

1. Увакин В.Ф. Гофрированная оболочка. Патент РФ №2200807, Бюл. №8, 2003.
2. Шумилин Б. Алмазная гальваника. Журнал “Изобретатель и рационализатор” №11, 1989, -С.14...16.
3. Соколов П. От космических кораблей до водопроводных труб. Журнал “Изобретатель и рационализатор” №9, 1996. –С.8...9.
4. Конструкционные материалы: Справочник /Под общей ред. Б.Н. Арзамасова. –М.: Машиностроение, 1990. –688с.
5. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент. Справочник /Под общей ред. В.А. Григорьева и Б.М. Зорина. –М.: Энергоиздат, 1982, -512с