



МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ РЕМОНТЕ ТРУБОПРОВОДОВ В УСЛОВИЯХ КОСМОСА

Ю. Л. ВАСЕНИН, канд. физ.-мат. наук, **А. А. ЗАГРЕБЕЛЬНЫЙ**, инж., **А. Т. ЗЕЛЬНИЧЕНКО**, **И. В. КРИВЦУН**, кандидаты физ.-мат. наук, **В. Ф. ШУЛЫМ**, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Предложена математическая модель тепловых процессов при пайке трубопроводов в условиях космоса. Разработано программное обеспечение для компьютерной реализации указанной модели. Проведено детальное компьютерное моделирование тепловых процессов при пайке трубопроводов из нержавеющей стали. Определены оптимальные геометрические параметры и условия нагрева паяемого соединения, а также время и энергия, необходимые для обеспечения процесса пайки.

Ключевые слова: космос, космический летательный аппарат, ремонт, трубопровод, пайка, припой, тепловые процессы, температурное поле, плавление, моделирование, исследования

Одной из важнейших проблем, стоящих перед специалистами аэрокосмической отрасли, является обеспечение ресурса космического летательного аппарата (КЛА) и его служебных систем, предусматривающего нормальную эксплуатацию весьма дорогого изделия в экстремальных условиях на протяжении нескольких лет (спутники различного назначения и межпланетные корабли) или даже десятилетий (орбитальные станции и производственные базы на других планетах). В настоящее время эта проблема решается двумя путями [1]:

создание новых материалов и соответственно новой элементной базы с закладыванием их в проекты перспективных КЛА;

обеспечение ремонтпригодности КЛА в условиях их эксплуатации.

Понятно, что наиболее оптимальным решением задачи ремонта является замена блоков или целых систем, вышедших из строя. Однако это не всегда осуществимо и всегда дорого. Поэтому не стоит отказываться от старых апробированных методов индивидуального поэлементного ремонта, который особенно эффективен в случае аварийного выхода из строя какого-либо узла, например в системе жизнеобеспечения КЛА. Здесь уместно провести аналогию между орбитальными станциями и современными подводными атомоходами, месяцами пребывающими в автономном плавании и имеющими на борту мастерские, оснащенные механическим и сварочным оборудованием, а также широким набором инструментария.

Актуальность проблемы обеспечения ремонта КЛА длительного использования особенно наглядно проявилась в последние годы эксплуатации орбитального комплекса «Мир». По данным специалистов, обеспечивающих поддержание станции в эксплуатационном режиме, примерно 50 % работ, проведенных на станции, связаны с ремонтом и восстановлением функционирования различных ее систем.

Одним из уязвимых и в то же время наиболее важных участков жизнеобеспечения подобных комплексов является многокилометровая система трубопроводов (стальных, титановых, алюминиевых) различного назначения. Представляется маловероятной возможность ремонта вышедшей из строя трубы с помощью простой ее замены (особенно в аварийной обстановке). В этом случае почти невозможно обойтись без традиционных способов соединения материалов методами сварки или пайки.

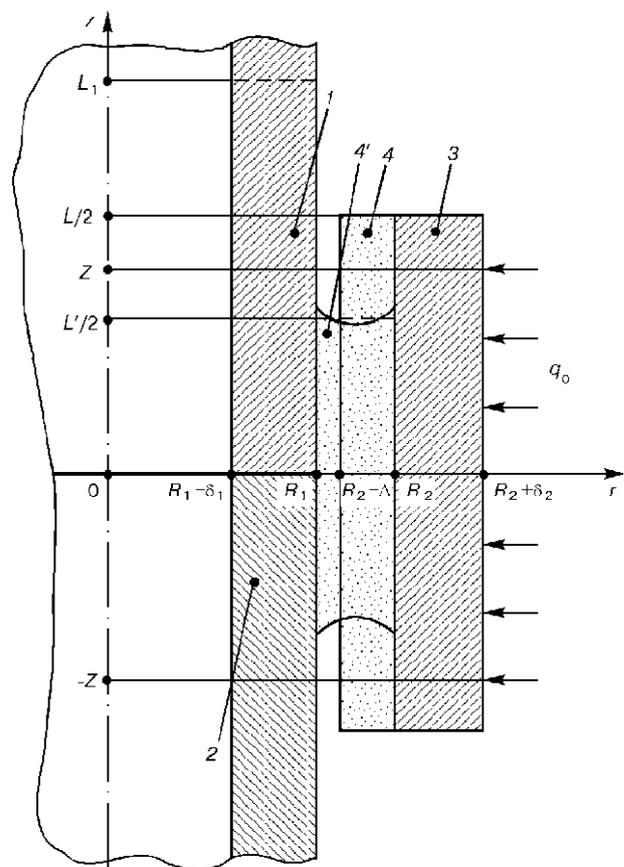


Рис. 1. Схема реализации паяного соединения при ремонте трубопровода КЛА: 1 – трубопровод; 2 – вкладыш; 3 – муфта; 4 – исходный слой припоя; 4' – расплав припоя (остальные обозначения см. в тексте)



Предметом настоящей работы является исследование тепловых процессов при ремонте трубопроводов КЛА в условиях космоса методом пайки. Решение такой задачи позволит определить наиболее эффективные технологические параметры будущей штатной бортовой аппаратуры для реализации указанного процесса, дающей возможность обеспечить ремонт трубопроводной системы долговременного КЛА силами мало- или совсем непрофессионального в этой технологии экипажа.

Наиболее простой для реализации соединения при пайке трубопроводов в условиях космоса является схема (рис. 1), предложенная академиком Б. Е. Патонем. В ее рамках поврежденный участок трубопровода заменяется изготовленным из того же металла трубчатым вкладышем соответствующих длины, внешнего и внутреннего диаметров. Вкладыш центрируется относительно оси трубопровода с помощью двух муфт (на рисунке показана только одна из них), которые после установки вкладыша в разрыв трубопровода сдвигаются со вкладыша на половину своей длины в сторону неповрежденных участков трубопровода. Затем с помощью источника тепла, распределенного по наружной поверхности муфты, как показано на рис. 1, производится нагрев изделия до полного расплавления припоя, заранее нанесенного на внутреннюю поверхность муфты, заполнения им части зазора между трубопроводом и муфтой и, наконец, до достижения температуры пайки в зоне контакта припоя с внешней поверхностью вкладыша и трубопровода*. В результате образуется паяное соединение.

Настоящая статья посвящена разработке математической модели и детальному компьютерному моделированию тепловых процессов при пайке трубопроводов из нержавеющей стали в условиях космоса. Целью моделирования является определение оптимальных геометрических размеров муфты и выбор ее материала, толщины слоя припоя, необходимого для нанесения на ее внутреннюю поверхность, а также оптимальных условий и времени нагрева изделия для обеспечения качественного паяного соединения.

Математическая модель. Для расчета температурного поля во всех компонентах соединения (области 1–4 (4') на рис. 1) при рассматриваемом способе ремонта трубопроводов КЛА будем использовать нестационарное квазилинейное уравнение теплопроводности. С учетом азимутальной симметрии системы это уравнение для каждой из указанных областей D_i ($i = 1, \dots, 4, 4'$) в цилиндрической системе координат (см. рис. 1) может быть записано в виде

$$\rho_i c_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial z} \right); r, z \in D_i, t > 0. \quad (1)$$

Здесь $T_i(r, z, t)$ — пространственно-временное распределение температуры в i -й области ($i = 1, \dots, 4, 4'$); $\rho_i(T)$ — плотность; $\lambda_i(T)$ — коэффициент

теплопроводности; $C_i(T)$ — эффективная теплоемкость соответствующего материала, которая определяется с учетом его теплоты плавления:

$$C_i(T) = c_i(T) + W_{mi} \delta(T - T_{mi}), \quad (2)$$

где $c_i(T)$ — удельная теплоемкость; W_{mi} — скрытая теплота плавления; T_{mi} — температура плавления материала i -й области.

Считая длину вкладыша достаточно большой, а положение муфты симметричным относительно плоскости контакта вкладыша с основным трубопроводом (плоскость $z = 0$ на рис. 1), температурное поле также можно предполагать симметричным относительно указанной плоскости. В этом случае на интервале от начала нагрева до полного расплавления припоя уравнение (1) можно решать только в трех из четырех рассматриваемых областей, например, в области 1 и в верхних половинах областей 3 и 4 (см. рис. 1):

$$\begin{aligned} D_1 &= \{r : R_1 - \delta_1 < r < R_1, 0 < z < L/2\}; \\ D_3 &= \{r : R_2 < r < R_2 + \delta_2, z : 0 < z < L/2\}; \\ D_4 &= \{r : R_2 - \Delta < r < R_2, z : 0 < z < L/2\}, \end{aligned} \quad (3)$$

где R_1 — внешний радиус трубопровода и вкладыша; δ_1 — толщина их стенок; R_2 — внутренний радиус муфты; δ_2 — толщина ее стенки; L — длина муфты; Δ — толщина исходного слоя припоя. Предполагаем, что после сборки рассматриваемого соединения между внешней поверхностью трубопровода и внутренней поверхностью слоя припоя существует зазор конечной ширины. С учетом того, что пайка производится в условиях невесомости, т. е. при отсутствии конвективной составляющей теплообмена между указанными поверхностями, теплообмен между трубопроводом и муфтой на начальных этапах нагрева соединения рассматривается только как радиационный [2]. В том случае, когда пайка производится внутри обитаемых отсеков КЛА, т. е. при атмосферном давлении, наряду с теплообменом излучением, следует учитывать и кондуктивную составляющую теплообмена, связанную с теплопроводностью воздуха, присутствующего в зазоре.

При решении уравнений теплопроводности полагаем, что после достижения во всех точках области D_4 температуры плавления (ликвидус) припоя, он изменяет свою форму под воздействием сил поверхностного натяжения и заполняет пространство между внутренней поверхностью муфты и внешней поверхностью трубопровода, как показано на рис. 1. Для дальнейшего решения системы уравнений (1) область D_4 будем приближенно рассматривать как область, имеющую прямоугольное сечение, которая при условии сохранения объема припоя может быть определена следующим образом (см. рис. 1):

$$D_4 = \{r : R_1 < r < R_2, z : 0 < z < L'/2\}, \quad (4)$$

где при выполнении условия $\Delta \ll R_2$ для длины этой области L' имеем

*Приведенная схема реализации паяного соединения является условной, реальное конструктивное исполнение указанного узла должно обеспечивать полное заполнение зазора расплавленным припоем и формирование галтелей.



$$L' \approx L \frac{2\Delta/R_2}{1 - (R_1/R_2)^2} \quad (5)$$

Кроме того, предполагается, что после контакта припоя с поверхностью трубопровода при $z < L'/2$ устанавливается идеальный тепловой контакт между областями D_1 и D_4 .

Зададим начальные и краевые условия для решения уравнений (1) в рассматриваемых областях. В качестве начального выберем очевидное условие

$$T_i|_{t=0} = T_c, \quad (6)$$

где T_c — температура окружающей среды. Краевые условия для уравнений (1) задаются исходя из следующих соображений. Поскольку предполагается, что температурное поле симметрично относительно плоскости $z = 0$, граничные условия для температуры во всех областях при $z = 0$ выбираются в виде условий симметрии решения. На внутренней границе области D_1 можно принять:

$$\frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=R_1-\delta_1} = 0, \quad (7)$$

так как в условиях невесомости конвективный теплообмен отсутствует, а радиационным теплообменом между участками внутренней поверхности при медленном изменении ее температуры в продольном направлении можно пренебречь. На границе области D_1 , которая противоположна плоскости $z = 0$, полагаем

$$T_1|_{z=L_1} = T_c. \quad (8)$$

Здесь L_1 — длина области D_1 , выбираемая настолько большой, что при дальнейшем ее увеличении изменение температурного поля в зоне нагрева соединения становится несущественным. На внешней поверхности трубопровода вне муфты ($z < L/2$) задаются условия радиационного теплообмена с окружающей средой:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=R_1} = \epsilon_1 \sigma_0 (T_c^4 - T_1^4|_{r=R_1}), \quad (9)$$

где ϵ_1 — степень черноты материала трубопровода; σ_0 — постоянная Стефана–Больцмана. Поскольку предполагается, что в результате сборки соединения между муфтой и поверхностью трубопровода существует зазор конечной ширины, прозрачный для теплового излучения, то на начальных этапах нагрева (до плавления припоя) граничные условия на внешней границе области D_1 при $0 < z < L/2$ принимаются в виде, аналогичном (9) при замене T_c на $T_4|_{r=R_2-\Delta}$ и ϵ_1 на приведенную степень черноты $\bar{\epsilon}_{1,4}$, вычисляемую по формуле из [2]:

$$\bar{\epsilon}_{1,4} = \frac{\epsilon_1 \epsilon_4}{\epsilon_1 + \epsilon_4 - \epsilon_1 \epsilon_4}, \quad (10)$$

где ϵ_4 — степень черноты материала припоя. После заполнения части зазора припоем граничное условие в зоне контакта припоя с поверхностью трубопровода, т. е. при $0 < z < L'/2$, заменяется условием идеального теплового контакта. Предполагается, что на остальной части поверхности тру-

бопровода, находящейся под муфтой, остаются справедливыми условия радиационного теплообмена с внутренней поверхностью муфты.

Граничные условия для области D_3 (см. рис. 1) зададим следующим образом. На внешней границе муфты в области воздействия на нее источника тепла, т. е. при $0 < z < Z$, примем

$$\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} \Big|_{r=R_2+\delta_2} = q_0, \quad (11)$$

где q_0 — плотность теплового потока, вводимого через поверхность муфты. На остальной части внешней поверхности муфты подобно (9) примем условия радиационного теплообмена с окружающей средой. Что касается внутренней границы области D_3 , то здесь задаются условия идеального теплового контакта со слоем припоя, которые выполняются при $z < L/2$ до момента полного расплавления исходного слоя припоя и при $z < L'/2$ после изменения формы области D_4 , тогда как при $L'/2 < z < L/2$ принимаются условия радиационного теплообмена внутренней поверхности муфты с поверхностью трубопровода.

Сформулируем граничные условия для области, занятой припоем (область 4 (4) на рис. 1). На границе этой области, контактирующей с металлом муфты, зададим условия идеального теплового контакта. На внутренней границе до момента полного расплавления припоя примем условия радиационного теплообмена с поверхностью трубопровода, которые заменяются условиями идеального теплового контакта после полного расплавления припоя. Наконец, на верхней границе рассматриваемой области, т. е. при $z = L/2$ ($z = L'/2$ после плавления припоя), задаются условия радиационного теплообмена с окружающей средой.

Этим исчерпывается постановка краевых задач для уравнений теплопроводности (1) применительно к рассматриваемому в настоящей статье способу ремонта трубопроводов в условиях космоса. Следует отметить, что описанная модель тепловых процессов при пайке трубопроводов является двумерной в отличие, например, от модели, предложенной в работе [3], где для расчета температурных полей при пайке тонкостенных трубчатых изделий использовались одномерные уравнения теплопроводности.

Результаты моделирования. Уравнения (1) с соответствующими начальными и граничными условиями решались численно методом конечных разностей. При решении получаемых разностных уравнений использовался метод переменных направлений [4]. Все расчеты выполнялись при следующих геометрических параметрах соединения: $R_1 = 6$ мм; $\delta_1 = 1$ мм; $L = 20$ мм; $R_2 = 6,5 \dots 6,7$ мм. При этом толщина Δ исходного слоя припоя варьировалась в диапазоне от 0,3 до 0,5 мм так, чтобы ширина зазора между муфтой и поверхностью трубопровода оставалась постоянной, равной 0,2 мм*; $\delta_2 = 1 \dots 2$ мм. Материалом трубопровода и вкладыша была нержавеющей сталь 10X18H9T; мате-

*Указанный размер зазора является максимально допустимым для пайки и выбран с учетом возможности ручной сборки паяемого соединения при работе за бортом КЛА.

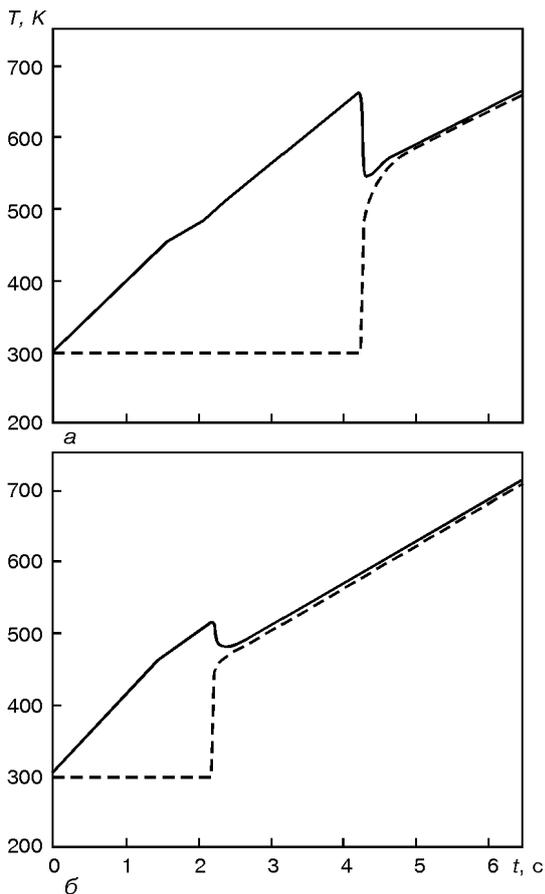


Рис. 2. Зависимость температуры T в различных точках изделия от времени t нагрева при использовании муфты из нержавеющей стали 10X18Н9Т (а) и меди (б) при $R_1 = 6$ мм; $\delta_1 = 1$ мм; $R_2 = 6,6$ мм; $\delta_2 = 1,5$ мм; $\Delta = 0,4$ мм; $P = 500$ Вт; сплошные кривые — в точке с координатами $r = R_2, z = 0$; штриховые — $r = R_1, z = 0$

риалом муфты — медь или та же сталь. В качестве припоя рассматривался предложенный в [5] припой системы Sn–Ni–Ge с большим содержанием олова и, следовательно, близкими к олову значениями теплофизических свойств. Все необходимые теплофизические свойства указанных материалов брали из работ [6–8]. Температура пайки нержавеющей стали указанным припоем была принята равной 900 К.

Вначале определялась оптимальная длина зоны нагрева муфты внешним источником тепла (нагревателем). При этом предполагалось, что тепловой поток равномерно распределен по внешней поверхности муфты в пределах области $-Z < z < Z$ (см. рис. 1), а его плотность q_0 задавалась соотношением

$$q_0 = \frac{P}{4\pi(R_2 + \delta_2)Z}, \quad (12)$$

где P — полная мощность, вводимая в изделие нагревателем.

Результаты моделирования показали, что наиболее оптимальные для пайки рассматриваемого соединения температурные поля в зоне контакта припоя с поверхностью трубопровода реализуются при выполнении условия $Z_1 \approx L'/2$. Уменьшение длины области нагрева сопровождается излишним перегревом центральных областей поверхности

муфты (вплоть до плавления ее материала). Увеличение Z_1 приводит к тому, что после расплавления припоя и образования идеального теплового контакта между муфтой и трубопроводом в области $z < L'/2$ перегреваются внешние края муфты. В результате температурный профиль в зоне контакта припоя с поверхностью трубопровода и вкладыша оказывается возрастающим по направлению к краям муфты, что особенно существенно в случае использования муфты из нержавеющей стали, имеющей значительно меньшую теплопроводность, чем медь. Такой температурный профиль в зоне пайки недопустим, поскольку уменьшение краевого угла смачивания припоем паяемой поверхности с повышением ее температуры может привести к растеканию припоя к краям муфты, что в свою очередь не позволит обеспечить качественное паяное соединение.

При выбранной длине зоны нагрева (для рассматриваемых геометрических параметров соединения значения $Z_1 = L'/2$ находятся в диапазоне 6,2...7,5 мм) были проведены расчеты зависимости температуры в различных точках изделия от продолжительности его нагрева при начальной температуре $T_c = 300$ К (пайка в обитаемых отсеках КЛА). На рис. 2 приведены соответствующие зависимости для центральных точек внешней поверхности трубопровода ($r = R_1, z = 0$) и центральных точек внутренней поверхности муфты ($r = R_2, z = 0$). Как следует из представленных кривых, температура поверхности трубопровода остается практически постоянной, равной исходной температуре изделия, вплоть до полного расплавления припоя, изменения его формы под действием сил поверхностного натяжения и образования идеального теплового контакта между припоем и поверхностью трубопровода. Температура внутренней поверхности муфты, равная температуре припоя в соответствующих точках, на начальном этапе нагрева практически линейно (за исключением процесса плавления припоя) возрастает со временем. Затем после контакта расплавленного припоя с относительно холодной поверхностью, он резко охлаждается, а поверхность трубопровода нагревается так, что их температуры выравниваются и дальнейший нагрев изделия приводит к линейному росту температуры в зоне пайки. Следует отметить, что в случае использования муфты из меди полное расплавление припоя происходит почти в 2 раза быстрее, чем в случае муфты из нержавеющей стали (рис. 2), что объясняется более высокой теплопроводностью меди и меньшей ее теплоемкостью.

Как уже было отмечено, после контакта расплавленного припоя с холодной поверхностью трубопровода и вкладыша происходит существенное остывание припоя (вплоть до частичного затвердевания), которое сменяется дальнейшим нагревом и плавлением. На рис. 3 показана эволюция теплового состояния припоя после его контакта с поверхностью трубопровода; время отсчитывалось с момента касания припоем паяемой поверхности.

Для определения энергетических характеристик процесса пайки были проведены расчеты продолжительности и нагрева соединения до заданного

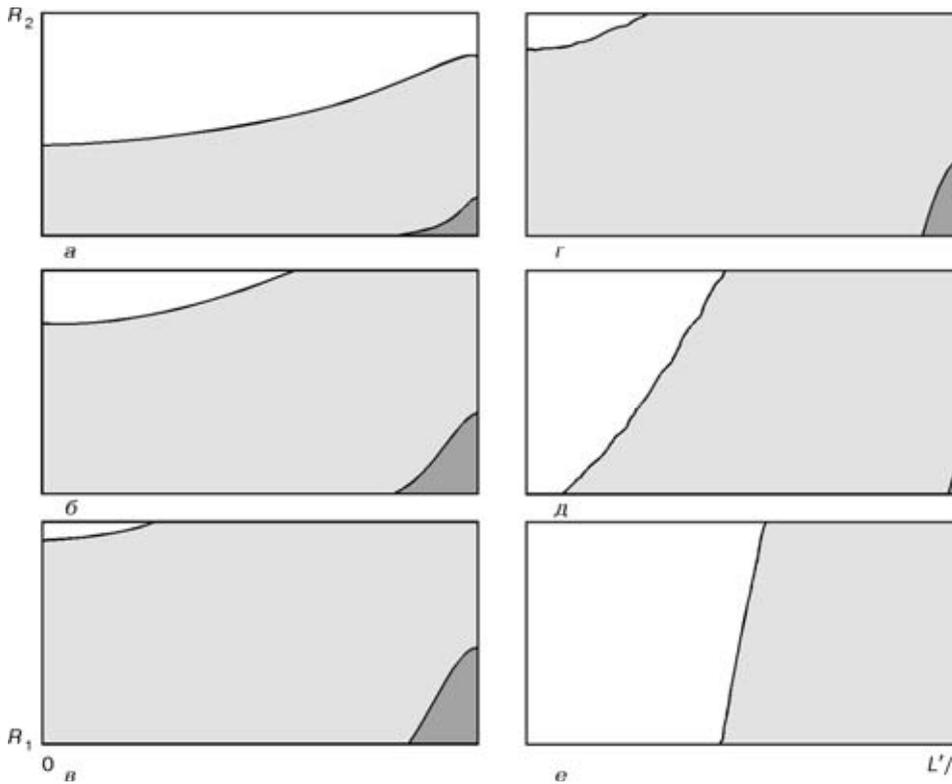


Рис. 3. Эволюция теплового состояния припоя после его контакта с поверхностью трубопровода при использовании муфты из нержавеющей стали при условиях, упомянутых в рис. 2, и $P = 250$ Вт: незатрихованные соответствуют жидкому состоянию припоя ($T \geq T_L = 493$ К); темные области — твердому состоянию ($T \leq T_S = 456$ К); серые — промежуточному состоянию: а — $t = 0,01$; б — $0,04$; в — $0,10$; г — $0,20$; д — $0,30$; е — $0,40$ с

теплового состояния и требуемой для этого энергии в зависимости от мощности, вкладываемой в изделие. Соответствующие расчетные данные, полученные для муфты из нержавеющей стали, приведены на рис. 4, а для муфты из меди — на рис. 5. Нижние кривые на рис. 4, а и рис. 5, а соответствуют времени нагрева соединения до полного расплавления припоя и установления идеального теплового контакта между припоем и поверхностью трубопровода. Нижняя граница серой области соответствует времени достижения температуры пайки хотя бы в одной точке контакта припоя с поверхностью трубопровода, а верхняя — времени прогрева всей паяемой поверхности до указанной температуры. Наконец, верхние кривые на этих рисунках соответствуют времени начала плавления поверхности муфты, т. е. ограничивают максимально допустимое время нагрева изделия при заданной вводимой мощности.

Как следует из кривых, приведенных на рис. 4, 5, время нагрева до достижения заданного теплового состояния естественным образом уменьшается с увеличением P . Что касается энергии, требуемой для разогрева всей паяемой поверхности до температуры пайки, $E_b = Pt_b$, где t_b — время нагрева до температуры пайки (верхняя граница серой области на рис. 4, а и рис. 5, а), то она также уменьшается с ростом мощности вводимой в изделие (рис. 4, б и рис. 5, б). Причиной этого является снижение доли энергетических потерь на теплопроводность и излучение в общем энергетическом балансе рассматриваемого соединения при увеличении скорости ввода энергии, определяемой величиной P .

Расчеты показали, что при прочих равных условиях время пайки t_b , а следовательно, и требуемая для обеспечения паяного соединения энергия

E_b увеличиваются вместе с толщиной стенки муфты, практически пропорционально увеличению объема ее материала. Кроме того, энергия, необходимая для обеспечения процесса пайки в случае использования муфты из меди, оказывается примерно на 20 % меньше, чем при использовании муфты из стали (рис. 4, б и рис. 5, б). Таким образом, наиболее энергетически выгодным способом реализации паяного соединения при ремонте трубопроводов из нержавеющей стали является использование медной муфты минимально допустимой толщины.

Оптимальный диапазон вводимых в изделие нагревателем мощностей, необходимых для реализации паяного соединения по рассматриваемой схеме — от 250 до 500 Вт, что составляет с учетом

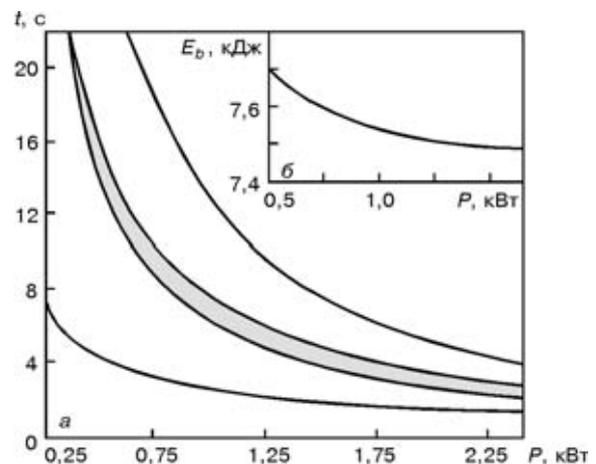


Рис. 4. Зависимость времени нагрева t изделия до заданного теплового состояния (а) и энергии E_b , необходимой для обеспечения процесса пайки (б), от вкладываемой мощности P при использовании муфты из нержавеющей стали 10Х18Н9Т ($R_1 = 6$ мм; $R_2 = 6,6$ мм; $\delta_1 = 1$ мм; $\delta_2 = 1$ мм; $\Delta = 0,4$ мм; $T_c = 300$ К)

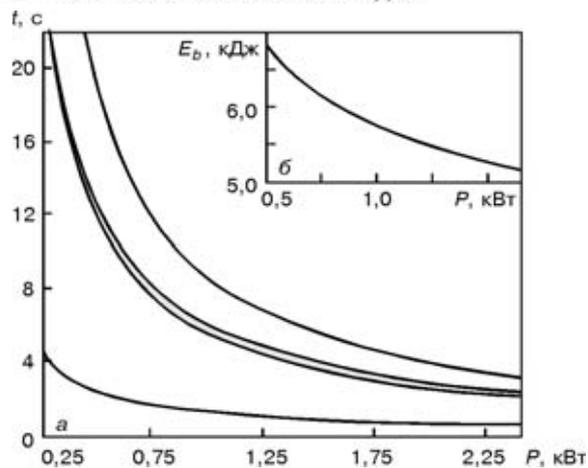


Рис. 5. Зависимость времени нагрева изделия до заданного теплового состояния (а) и энергии, необходимой для обеспечения процесса пайки (б), от вкладываемой мощности при использовании муфты из меди (см. параметры и обозначения рис. 4)

КПД самого нагревателя и процесса передачи тепла к изделию не более 1 кВт потребляемой электрической мощности. С одной стороны, такие мощности могут быть легко обеспечены бортовой электросетью КЛА, а с другой, позволяют производить процесс пайки за относительно небольшое (около 10...30 с) время. Так, например, время, необходимое для достижения температуры пайки во всех точках паяемой поверхности при $P = 500$ Вт и $T_c = 300$ К, составляет 12,3 с в случае использования муфты из меди (см. рис. 4, а) и 15,5 с, если муфта из 10X18H9T (рис. 5, а). Кроме того, как следует из этих же рисунков, введение в изделие такой мощности позволяет обеспечить достаточный (более 6 с) временной интервал между окончанием процесса пайки и началом плавления материала муфты.

Наконец, если пайка производится в открытом космосе, то время нагрева соединения до температуры пайки и соответственно необходимая для этого энергия могут существенно зависеть от начальной температуры изделия. В частности, при ремонте трубопровода на солнечной стороне КЛА, где начальная температура составляет 400 К, продолжительность пайки рассматриваемого соединения в случае использования муфты из меди составляет

A mathematical model of thermal processes in tube brazing in space is proposed. Software has been developed for implementation of this model in the computer. Detailed computer modeling of thermal processes in stainless steel tube brazing has been performed. The optimal geometrical parameters and conditions of brazed joint heating are determined, as well as the time and energy required to ensure the brazing process.

10,4 с ($E_b = 5,2$ кДж), тогда как на теневой стороне при $T_c = 180$ К — 14,4 с ($E_b = 7,2$ кДж).

В заключение необходимо отметить, что настоящая работа носит теоретический характер и ее результаты требуют экспериментальной проверки, включая натурные испытания.

Выводы

1. Разработаны математическая модель тепловых процессов при пайке трубопроводов в условиях космоса, соответствующий вычислительный алгоритм и программное обеспечение для компьютерной реализации данной модели.

2. Результаты моделирования показали, что использование при пайке рассматриваемого соединения муфты из меди дает энергетический выигрыш до 20 % по сравнению со стальной муфтой, а также позволяет обеспечить более равномерное распределение температуры в зоне пайки.

3. При пайке соединений подобных геометрических размеров наиболее оптимальными являются мощности 250...500 Вт, вводимые в изделие нагревателем, что позволяет нагреть зону контакта припоя с поверхностью трубопровода до температуры пайки за 10...30 с.

1. *Космос: технологии, материаловедение, конструкции* / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 2000. — 528 с.
2. *Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена.* — М.: Атомиздат, 1979. — 416 с.
3. *Расчет* нагрева многослойного трубчатого изделия под пайку / А. Т. Зельниченко, С. А. Вакуленко, А. Р. Булацев и др. // *Автомат. сварка.* — 1988. — № 2. — С. 30–32.
4. *Андерсон Д., Таптехил Дж., Плетчер Р.* Вычислительная гидромеханика и теплообмен. — Т. 1. — М.: Мир, 1990. — 384 с.
5. *Анализ* неразъемных соединений трубчатых элементов типа сварка-пайка и пайка, выполненных с помощью УРИ / А. А. Загребельный, С. С. Гавриш, А. Р. Булацев и др. // *Проблемы космической технологии металлов.* — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1968. — С. 13–26.
6. *Справочник по пайке* / Под ред. И. Е. Петрунина. — М.: Машиностроение, 1984. — 400 с.
7. *Ларионов Л. Н., Юрченко Ю. Ф.* Структура и свойства металлов и сплавов: Справочник. Тепловые свойства металлов и сплавов. — Киев: Наук. думка, 1985. — 438 с.
8. *Таблицы физических величин: Справочник* / Под ред. И. К. Кикоина. — М.: Атомиздат, 1976. — 1008 с.

Поступила в редакцию 05.03.2001