

Научная статья

Математическая модель течения припоя в вертикальной трубке при различных уровнях гравитации с учетом процессов смачивания и плавления

С.А. Груздь¹, Д.С. Самсонов¹, М.Д. Кривилев^{1,2}

¹ Удмуртский государственный университет, Ижевск, Российская Федерация

² Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск, Российская Федерация

С использованием модели фазового поля, записанной для расчета течения многофазной среды, рассмотрено движение расплава припоя внутри керамической трубки, в которой имеется пустотелый цилиндрический вкладыш из алюминиевого сплава. Задача решалась в неизотермической постановке, что позволило изучить динамику двухфазного течения, кинетику движения контрольной контактной точки системы при смачивании вкладыша. Рассчитано полное время, необходимое припою на нагрев, плавление и дальнейшее движение по полости внутри вкладыша под действием сил смачивания. Теплота плавления припоя в системе учтена через введение эффективной теплоемкости как функции температуры. Вычислены значения безразмерных чисел Бонда, Релея, Грасгофа и Марангони, которые позволили оценить вклад различных физических явлений в поведение системы. Установлено незначительное влияние сил гравитации на форму верхней и нижней свободных поверхностей расплава при его движении вдоль оси симметрии системы вследствие небольшой массы припоя и малого диаметра трубки. Получены графики изменения положения центра масс припоя. При наличии силы гравитации модель прогнозирует вытекание припоя из алюминиевого вкладыша, в то время как в условиях микрогравитации этого не происходит. Проанализированы поля скоростей, которые развиваются в жидком припое при разных уровнях гравитации. В условиях микрогравитации максимальные скорости обусловлены движением расплава за счет сил смачивания, в то время как при земной гравитации присутствуют конвекционные потоки в пристеночной области, поэтому средние скорости на два порядка выше. Отмечено незначительное влияние термокапиллярного эффекта на среднюю величину скорости гидродинамических потоков вследствие низких температурных градиентов.

Ключевые слова: двухфазное течение, поверхностное натяжение, плавление припоя, контактный угол смачивания, гравитация, математическая модель

Получение: 30.05.2024 / Публикация онлайн: 30.12.2024

УДК 538.93

1. Введение

Высокотемпературная пайка, в технической литературе известная также как пайка твердым припоем, имеет высокую практическую значимость в случае, когда требуется или качественное соединение двух металлических изделий сложной формы, или необходимо устранить повреждение поверхности [1, 2]. Если обеспечена хорошая смачиваемость поверхности изделия, то припой затекает даже в труднодоступные места. Особенности такой технологии делают ее перспективной для применения в целом в машиностроении. Например, она широко используется при изготовлении воздушных теплообменников и радиаторов с большим количеством пластин охлаждения. С учетом этого высокотемпературная пайка может успешно служить при ремонте металлических корпусов, возведении модульных тонкостенных конструкций, в том числе в условиях космического пространства, то есть при воздействии микрогравитации. Последнее из отмеченных направлений становится особенно актуальным в наши дни, поскольку длительные полеты в космос, а также возведение космических станций требуют для соединения различных металлических элементов конструкций разработки таких технологий, которые не получается отработать на Земле [3, 4].

Первые эксперименты по пайке в условиях микрогравитации проводились еще советскими учеными. Основные результаты, полученные на станции «Мир», представлены в работе [5]. На борту международных космических станций (МКС) учеными НАСА изучались механизмы возникновения термокапиллярных потоков, не зависящие от силы тяжести и вызванные температурными градиентами внутри расплавленного припоя [6]; выполнена серия испытаний по пайке в вакууме [7]. Рассмотрению вопросов, связанных с термодинамическими и кинетическими законами смачивания посвящены публикации отечественных исследователей [8, 9].

Для анализа явлений и процессов, составляющих высокотемпературную пайку при различных силах гравитации целесообразно прибегать к математическим моделям. Они позволяют создавать компьютерные двойники, на которых можно проводить серии вычислительных экспериментов для отработки технологии и с их помощью оценивать влияние на систему различных параметров. Подобные численные модели базируются на методах расчета течения многофазных сред, среди которых наиболее известные — это методы фазового поля, функции уровня, подвижной границы Эйлера–Лагранжа [10–13]. Формулировка некоторых моделей применительно к задаче смачивания представлена в ранних работах авторов настоящей статьи (см. [14–16]). При этом верификация предложенных моделей произведена на основе информации об образцах, испытанных на борту МКС в рамках космического эксперимента «Реал», — совместного проекта Роскосмоса и НАСА. В отмеченном проекте исследовалась реология алюминиевых сплавов при высокотемпературной поверхностной пайке образцов различной геометрической формы. В [16, 17] представлены результаты верификации результатов численных расчетов с помощью данных космического эксперимента.

2. Постановка задачи

Рассматривается задача течения припоя, состоящего из сплава Al–10%Si, внутри ампулы, которая представляет собой керамическую трубку, изготовленную из оксида алюминия Al_2O_3 , внутри которой имеется пустотелый цилиндрический вкладыш из сплава АМц (Al–Mn) с содержанием марганца от 1.0 до 1.5 вес.%. Трубка ориентирована вертикально и наполнена инертным газом (азотом). В начальный момент времени припой находится в твердом состоянии в верхней части трубки и контактирует с торцом вкладыша (Рис. 1а). Сначала ампула с образцом в наземных или космических условиях прогревается до температуры плавления припоя, далее осуществляется ее выдержка при постоянной температуре, после чего производится охлаждение.

Математическая постановка задачи выполнена в двухмерной осесимметричной постановке. Расчетная схема представлена на рисунке 1б. Полагается, что к внешней поверхности трубки приложен постоянный тепловой поток, имитирующий печной нагрев системы в эксперименте. На внутренних участках стенки трубки контакт с разными материалами учитывается в виде соответствующих граничных условий.

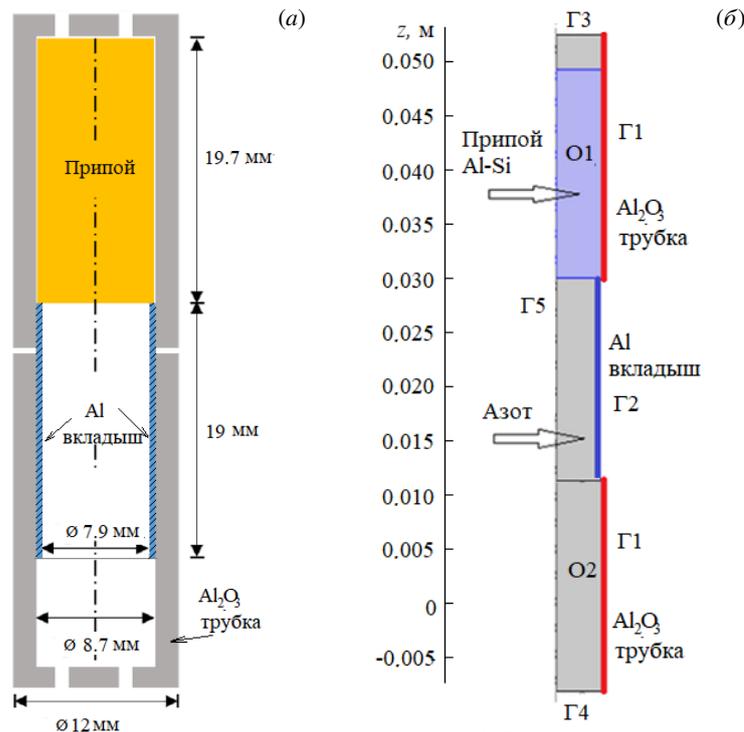


Рис. 1. Схематическое изображение ампулы с тестовым образцом для наземных и космических испытаний (а) и расчетная область с начальным положением припоя (O1), вкладыша (G2) и газовой фазы (O2) (б)

Математическая формулировка задачи включает уравнения [16, 17]:

$$\rho(\varphi, T) \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \left[\mu(\varphi, T) \left(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T \right) \right] + \rho(\varphi, T) \mathbf{g} + \mathbf{F}_{st}, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0. \quad (2)$$

Здесь (1) — уравнение Навье–Стокса для вязкой жидкости, а (2) — условие ее несжимаемости, при этом t — время; \mathbf{u} — вектор скорости жидкости; ∇ — векторный дифференциальный оператор; $\rho(\varphi, T)$ и $\mu(\varphi, T)$ — плотность и динамическая вязкость среды, которые являются функциями температуры T и параметра порядка φ , изменяющегося в диапазоне от -1 до 1 при переходе из одного фазового состояния в другое ($\varphi = -1$ обозначает газ, $\varphi = 1$ — припой); p — давление в потоке; \mathbf{g} — вектор ускорения свободного падения; \mathbf{F}_{st} — сила поверхностного натяжения между газом и расплавом. С учетом эффекта Марангони уравнение для силы \mathbf{F}_{st} , имеет вид [18–20]:

$$\mathbf{F}_{st} = (\lambda/\kappa) M \nabla \varphi. \quad (3)$$

Здесь $\lambda = (3/\sqrt{8}) h \sigma(T)$ — сила, обусловленная взаимным притяжением молекул на поверхности расплава, [Н], где $\sigma(T)$ — поверхностное натяжение на границе «расплав–газ» как функция температуры, [Н/м]; κ — коэффициент, равный $\kappa = h^2$, где h — толщина диффузной границы, [м]; M — химический потенциал, характеризующий скорость, с которой меняется свободная энергия при изменении концентрации припоя на фазовой границе.

Параметры φ и M из уравнения (3) связаны системой уравнений Кана–Хилларда:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \varphi = \nabla \cdot (B \nabla M), \quad (4)$$

где химический потенциал M выражается как

$$M = \varphi(\varphi^2 - 1) - \kappa \nabla^2 \varphi. \quad (5)$$

При этом $B = n_s \lambda / h^2$ — коэффициент мобильности фазового поля, [м²/с], в котором n_s — параметр мобильности, [м²/с], описывающий чувствительность модели фазового поля к диффузионному движению межфазной границы. Величина n_s должна быть достаточно большой, чтобы конечная толщина межфазной границы, выражаемая, в соответствии с предыдущими уравнениями, через силу поверхностного натяжения, сохранялась. Но параметр n_s не должен превышать определенную величину и быть таким, чтобы слагаемое $\mathbf{u} \cdot \nabla \varphi$, отвечающее за конвективный перенос фазового поля (многофазной среды), не подавлялось диффузионным слагаемым в уравнении (4). В представленной работе значение параметра n_s задано пропорциональным квадрату толщины диффузионной границы: $n_s \sim h^2$ [18].

Система уравнений (1)–(5) дополняется уравнением баланса внутренней энергии, которое записывается в виде:

$$\rho(\varphi, T) c_p(\varphi, T) \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (k(\varphi, T) \nabla T), \quad (6)$$

где $c_p(\varphi, T)$ и $k(\varphi, T)$ — удельная теплоемкость и теплопроводность фазы как функции параметра порядка и температуры. На границах раздела фаз, где параметр порядка имеет нецелые значения, свойства среды определяются исходя из соотношений:

$$\rho = \rho_{gas} \theta_{gas} + \rho_{Al} \theta_{Al}, \quad (7)$$

$$\mu = \mu_{gas} \theta_{gas} + \mu_{Al} \theta_{Al}, \quad (8)$$

где θ_{gas} и θ_{Al} — доли газа и расплава, зависящие от параметра порядка φ согласно формулам:

$$\theta_{gas} = (1 - \varphi)/2, \quad \theta_{Al} = (1 + \varphi)/2. \quad (9)$$

Термодинамические свойства сред являются функциями температуры. Для припоя вид таких зависимостей, с учетом его перехода из твердой фазы в жидкую, приведен на рисунке 2. Теплота плавления принята во внимание через функцию эффективной теплоемкости. Температура солидуса и ликвидуса для выбранного материала припоя составляют 853 и 873 К соответственно.

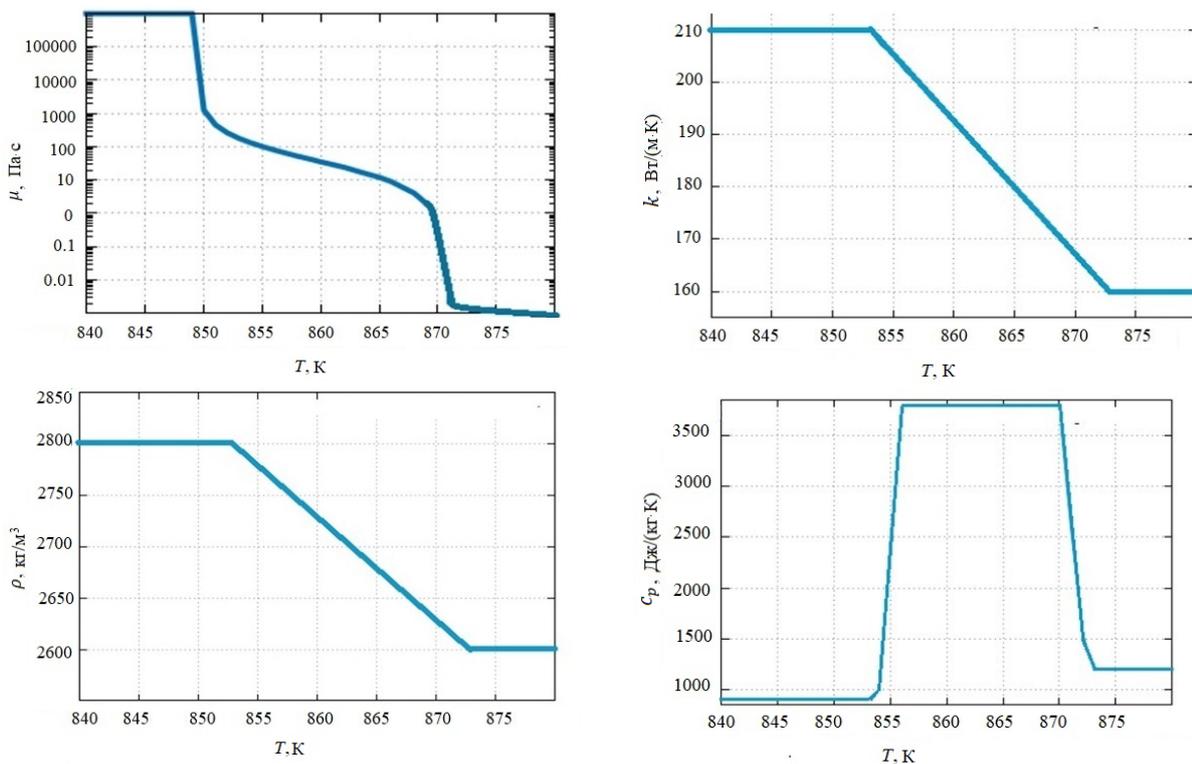


Рис. 2. Зависимости термодинамических параметров припоя от температуры

Задача решается при следующих начальных и граничных условиях:

- в начальный момент времени припой, как уже сказано выше, находится в твердом состоянии и занимает область O1 (Рис. 1б), область O2 заполняет газовая среда (азот). Скорости в начальный момент времени нулевые;
- для уравнения сохранения импульса (1) граница Г5 есть ось симметрии, на которой $\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = 0$; на Г1 и Г2 выполняются условия проскальзывания, обеспечивающие отсутствие потока через границу и наличие касательных напряжений [21]:

$$K_\tau = -(\mu/\beta)\mathbf{u}, \quad (10)$$

где β — длина участка проскальзывания, [м], Г3 и Г4 — открытые границы, поэтому

$$\left[-\nabla p + \nabla \cdot \left[\mu(\varphi, T) \left(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T \right) \right] \right] \mathbf{n} = -p_{hydro} \mathbf{n},$$

где $p_{hydro} = \rho g(z - z_0)$, \mathbf{n} — вектор нормали к поверхности, z и z_0 — текущая вертикальная координата и вертикальная координата нижней границы расчетной области;

- для уравнения баланса энергии (6) на границах Г1 и Г2 принимается граничное условие 3-го рода для многослойной цилиндрической стенки, согласно которому температура внешней среды задается как функция времени: $T_{ext} = T_0 + V_T \cdot t$, где $V_T = 5$ К/мин — скорость нагрева стенки, $T_0 = 550$ °С — начальная температура всей системы. На границах Г3 и Г4 принимается граничное условие 1-го рода, то есть здесь температура равняется температуре внешней среды T_{ext} ;

– для уравнения фазовой переменной φ границы Г3 и Г4 являются периодическими. На участках, где припой контактирует со стенками трубки и алюминиевым вкладышем, устанавливаются граничные условия смачиваемой стенки: на границах Г1 и Г2 равновесный угол смачивания θ подчиняется уравнению Юнга, дополненному условием непроницаемости (см. [18]):

$$\mathbf{n} \cdot \kappa \nabla^2 \varphi = \kappa \cos \theta |\nabla \varphi|, \quad \mathbf{n} \cdot B \nabla M = 0; \quad (11)$$

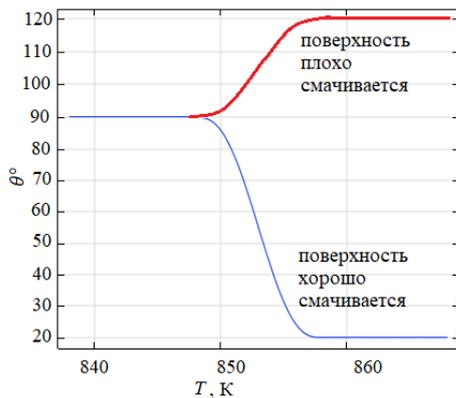


Рис. 3. Зависимость величины контактного угла смачивания θ от температуры для различных поверхностей; тонкая линия — алюминиевый вкладыш, толстая линия — трубка из оксида алюминия

– для корректного учета в задаче условий контакта в процессе плавления величина контактного угла смачивания принимается в виде функции температуры; ее зависимость для разных материалов стенок представлена на рисунке 3. Приведенные графики построены на основе интерполяции данных, полученных ранее для выбранных материалов припоя и вкладыша в лабораторных экспериментах [17].

Предложенная математическая модель течения припоя в вертикальной трубке при различных уровнях гравитации с учетом процессов смачивания и плавления реализуется в лицензионном инженерном программном пакете Comsol Multiphysics [18] как двумерная осесимметричная задача. Численное решение производится методом конечных элементов на адаптивной сетке, которая сгущается около границ расчетной области. Ячейки сетки треугольные, общее число степеней свободы 30 000. Зависимые величины по пространственным переменным дискретизируются линейно, с использованием полиномов Лагранжа. Дискретизация по времени осуществляется по формуле дифференцирования назад с двумя членами в формуле разложения.

3. Результаты моделирования

За счет хорошей смачиваемости внутреннего алюминиевого вкладыша припой, нагретый до температуры плавления, постепенно затекает в полость вкладыша. Достигнув нижней грани вкладыша, припой на несколько секунд приостанавливает движение и, если эксперимент осуществляется при земной гравитации, то сила тяжести способствует дальнейшему продвижению всей массы припоя вниз вдоль оси вращения системы до тех пор, пока температура не опустится ниже температуры солидуса и припой затвердеет (Рис. 4). Если эксперимент проходит в условиях микрогравитации, то движение припоя останавливается уже на уровне кромки нижнего торца вкладыша (Рис. 5). Поверхностные мениски внутри вкладыша приобретают равновесную форму и движение припоя вниз становится невозможным, так как керамические стенки трубки имеют плохую смачиваемость (Рис. 6), а другие силы, которые повлияли бы на течение расплава, отсутствуют.

Наличие сил гравитации влияет на движение припоя вниз по трубке. Так, в момент времени $t = 506$ с положение нижней границы припоя в наземных условиях соответствует отметке $z = 5$ мм, в то время как в условиях микрогравитации вертикальная координата составляет $z = 8$ мм (Рис. 4 и 5). Итоговая форма нижней и верхней поверхностей припоя зависит от того, в каком месте трубки происходит его кристаллизация. В месте контакта расплава с керамической трубкой наблюдается выпуклая форма поверхности, в месте алюминиевого вкладыша — вогнутая (Рис. 6). Влияние сил гравитации на форму поверхности не выявлено, причиной этого могут быть

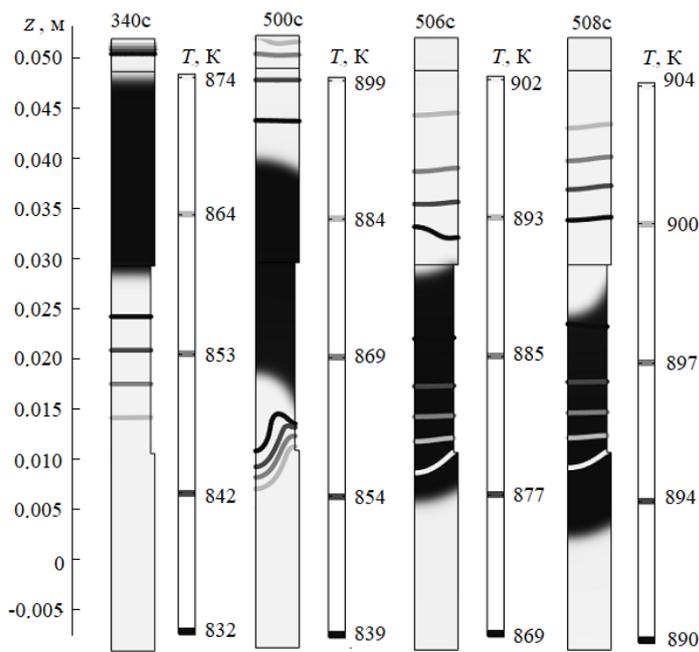


Рис. 4. Положение припоя в трубке после его плавления в наземных условиях ($1g$) в различные моменты времени; градиентные линии – изолинии температуры; черный сплошной цвет соответствует конденсированной (твердой или жидкой) фазе припоя, белая область – газовой фазе (азоту)

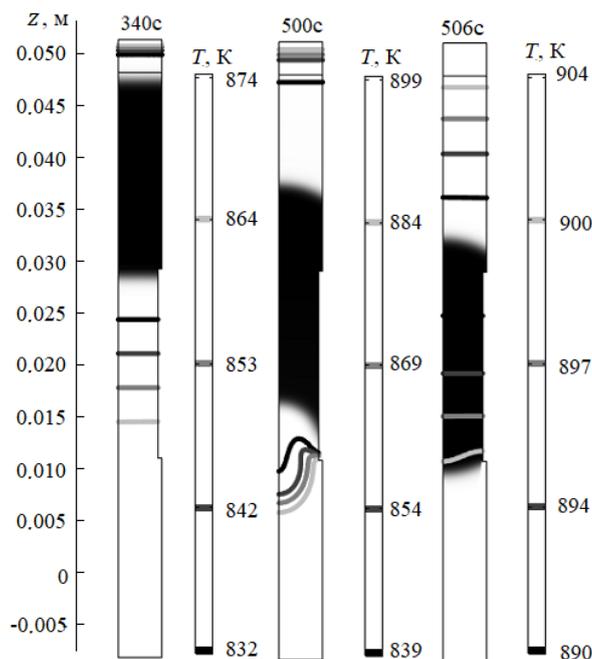


Рис. 5. Положение припоя в трубке после его плавления в условиях микрогравитации (μg) в различные моменты времени; градиентные серые линии – изолинии температуры; черный сплошной цвет соответствует конденсированной (твердой или жидкой) фазе припоя, белая область – газовой фазе (азоту)

маленькие диаметры трубки и вкладыша. Ранее, в работе [16], авторами отмечалось, что для припоя малой массы при смачивании стержней малого диаметра различие форм менисков при разных силах гравитации несущественно.

Число Бонда, которое определяет соотношение между силой тяжести и силами поверхностного натяжения, описывается как

$$Bo = \frac{gL^2\Delta\rho}{\sigma}, \quad (12)$$

где g — ускорение свободного падения, L — характерный размер, $\Delta\rho$ — разность плотностей расплава и газовой среды, σ — поверхностное натяжение. Для поставленной задачи число Бонда равно $Bo = 0.47$, что подтверждает результаты моделирования о незначительном влиянии сил гравитации на форму мениска в рассматриваемой трубке.

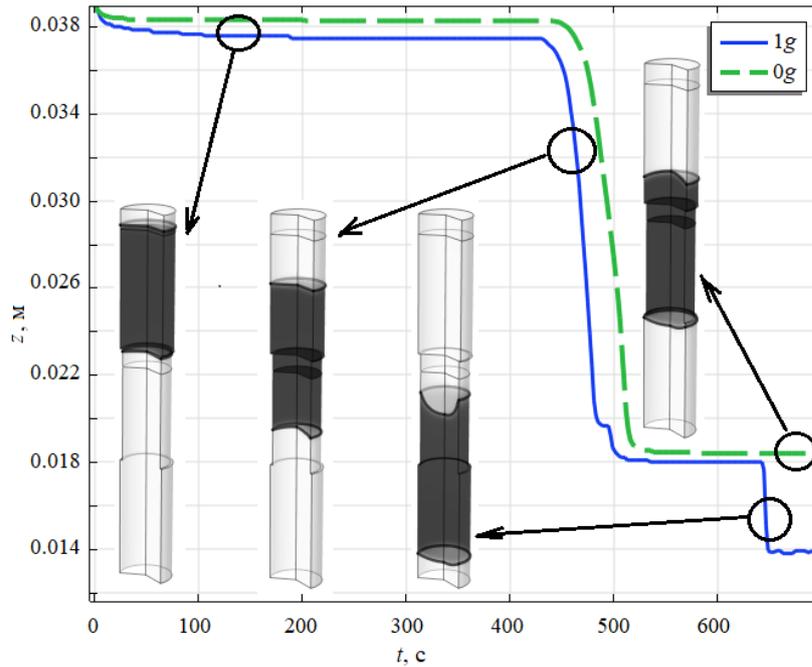


Рис. 6. Изменение вертикальной координаты центра масс припоя, рассчитанное для разных уровней гравитации; положение припоя в трубке в разные моменты времени

В задачах высокотемпературной пайки с технической точки зрения немаловажным фактором является окончательная структура материала припоя после затвердевания. Один из параметров, который напрямую оказывает влияние на эту структуру — скорости гидродинамических потоков внутри расплава в процессе смачивания [22]. Наличие или отсутствие силы тяжести при движении припоя вдоль трубки, а также термокапиллярный эффект могут существенно изменять интенсивность потоков, в том числе изменять их направление. В связи с этим поле скорости — важный результат, который можно получить с помощью численного моделирования.

Нагрев газа, а также припоя в керамической трубке по причине контакта с ее горячей стенкой происходит интенсивнее в пристеночной области. Если эксперимент осуществляется в условиях земной гравитации, это вызывает свободные конвективные потоки. Для оценки влияния сил гравитации на жидкий припой необходимо знать число Релея Ra , которое определяет поведение жидкости под воздействием градиента температуры, и число Грасгофа Gr , которое является мерой соотношения силы Архимеда и сил вязкости среды. Данные критерии представляются как [23]

$$Gr = \frac{g\beta_T \Delta T l^3}{\nu^2}, \quad (13)$$

$$Ra = GrPr = \frac{g\beta_T \Delta T l^3}{\nu a}, \quad (14)$$

где β_T — коэффициент теплового расширения (1/К), ΔT — разность температуры стенки и припоя, l — характерный размер, ν — кинематическая вязкость, a — коэффициент температуропроводности. Для рассматриваемой задачи параметры, описывающие процесс теплопереноса, следующие: $\Delta T = 10$ К — средний перепад температуры внутри припоя (согласно численным расчетам), $l = 7.9$ мм — внутренний диаметр вкладыша, число Прандтля Pr для жидкого припоя — 0.037. Исходя из этого, числа (13) и (14) равняются: $Gr = 4.8 \cdot 10^5$, $Ra = 17760$, что является показателем развитого ламинарного пограничного слоя около стенки нагреваемой извне трубки в задачах с гравитацией [24].

Анализ результатов расчетов по предложенной математической модели (см. Рис. 6) выявил, что на полное затекание припоя в трубку уходит ~ 80 с, при этом среднее значение скорости движения припоя равняется 0,2 мм/с для любых условий гравитации. Однако в промежутке от 520 до 640 с течение жидкого припоя временно приостанавливается и занимает квазистационарное положение. Поле скоростей системы на 580 с представлено на рисунке 7, где векторами показаны направления потоков. Согласно рисунку, в этот момент времени максимальные скорости потоков в условиях земной гравитации составляют 0,5 мм/с, в то время как при микрогравитации максимальное значение скорости 0,0018 мм/с. Такая разница в значениях максимальных скоростей в момент прекращения движения припоя объясняется тем, что при земной гравитации в системе присутствуют конвективные потоки в пристеночной области (Рис. 7а), а в условиях микрогравитации (μg) они отсутствуют (Рис. 7б), при этом значения скоростей сопоставимы с величиной погрешности (практически они нулевые).

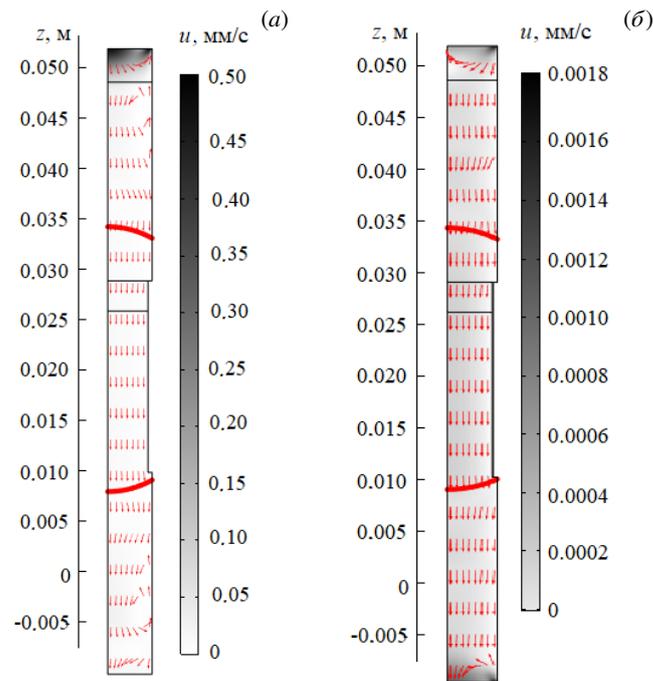


Рис. 7. Поле скоростей системы на 580 с при разных условиях гравитации: наземная ($1g$) (а), микрогравитация (μg) (б); толстые линии – верхняя и нижняя поверхности припоя; стрелками показано направление потоков

Характер движения потоков может зависеть от термокапиллярного эффекта. Число Марангони определяет, насколько в данной системе значимы поверхностные силы по сравнению с вязкими силами [23]:

$$\text{Ma} = \frac{d\sigma}{dT} \frac{l\Delta T}{\mu a}, \quad (15)$$

где $d\sigma/dT$ — производная поверхностного натяжения по температуре, l — характерный размер, то есть длина участка, на котором происходит изменение поверхностного натяжения σ (в рассматриваемой задаче — это внутренний диаметр вкладыша), ΔT — скачок температуры, μ — динамическая вязкость, a — коэффициент температуропроводности [25]. Для представленной системы и выбранного материала припоя число Марангони составляет $\text{Ma} = -11.8$. Согласно полученным расчетным данным, среднее значение температурного скачка ΔT вдоль радиуса трубки равняется 100 К/м. В итоге термокапиллярный эффект вносит незначительный вклад в изменение поля скорости, поэтому в численной модели соответствующим слагаемым можно пренебречь. Объясняется такой результат малой длиной участка, на котором наблюдается изменение поверхностного натяжения, высоким коэффициентом теплопроводности материалов, а также низкой скоростью нагрева системы.

4. Заключение

Общая картина движения вниз по трубке припоя после плавления различна при разных условиях гравитации. Согласно результатам (см. Рис. 6), движение припоя после плавления в условиях земной гравитации начинается на 10 с раньше, чем в условиях микрогравитации. Дальнейшее движение по трубке в целом имеет односторонний характер, так как силы гравитации вносят несущественный вклад в динамику движения, а перемещение объема расплава в большей степени обуславливается хорошей смачиваемостью алюминиевого вкладыша. В частности, для продвижения расплава припоя из начального положения до нижней кромки вкладыша при любых условиях гравитации затрачивается 80 с.

Отличие в характере течения проявляется на заключительной стадии. После достижения припоем нижней кромки вкладыша в случае земной гравитации движение его центра масс приостанавливается. Анализ показал, что данное явление имеет физическую природу и связано с прохождением контактной точкой уступа между вкладышем и стенкой керамической трубки. Этот процесс обуславливается двумя обстоятельствами: 1) торможением вследствие сложной конфигурации поверхности стенки в этом месте; 2) зависимостью формы свободной поверхности расплава от баланса сил поверхностного натяжения и изменяющегося контактного угла. Таким образом, граница перехода от смачиваемой стенки полости вкладыша к несмачиваемой керамической стенке трубки тормозит течение расплава, что приводит к значимой задержке движения контактной точки. После преодоления уступа припой двигается вниз по трубке под действием силы гравитации. Отмеченная особенность не наблюдается в условиях микрогравитации, при которых расплав занимает равновесное положение внутри алюминиевого вкладыша.

Выявлено, что, независимо от уровня гравитации, не следует выдерживать систему при высоких температурах длительное время, так как это может привести или к вытеканию припоя из вкладыша (если эксперимент проходит в условиях земной гравитации), или начнется разрушение матричного материала из-за перегрева системы. Полученные результаты по выбору скоростей нагрева и выдержки припоя могут служить основой для дальнейшей разработки технологии высокотемпературной пайки как в условиях микрогравитации, так и в наземной лаборатории.

Основными эффектами, влияющими на движение припоя, являются капиллярные силы, возникающие в точке контакта расплава со стенкой, за счет которых и происходит затекание припоя в полость алюминиевого вкладыша. Анализ критериальных чисел показал, что наличие сил гравитации оказывает незначительное влияние на форму свободных поверхностей жидкого припоя, а также на его положение внутри вкладыша. В большей степени причиной этого являются малый диаметр трубки и малая масса припоя. К такому же выводу пришли авторы статьи [10], в которой рассмотрено смачивание стержня. Влияние термокапиллярного эффекта на расплав в представленной постановке мало, в связи с чем в математической модели описывающее его слагаемое можно не учитывать.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-21-00413).

Литература

1. Новосадов В.С. Адгезия и ее роль в пайке (Аналитический обзор) // Пайка-2021: сборник материалов международной научно-технической конференции. Тольятти, 7–10 сентября 2021 г. Тольятти: Тольяттинский государственный университет, 2023. С. 106–139.
2. Краснов Е.И., Курбаткина Е.И., Шавнев А.А., Серпова В.М., Жабин А.Н. Применение метода активной пайки для соединения волоконистых композиционных материалов с керамическими покрытиями (Обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 10. С. 63–72. DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-10-63-72
3. Леонов В.А. Постоянная лунная станция как приоритет России в освоении ресурсов космоса // Воздушно-космическая сфера. 2021. № 4. С. 56–67. DOI: 10.30981/2587-7992-2021-109-4-56-67
4. Дреева Н.А., Землина А.С. Лунная обитаемая станция: электростанция и коммуникационное оборудование // Актуальные научные исследования в современном мире. 2021. № 10. С. 41–43.
5. Paton B.E. Space: Technologies, Materials, and Structures. London: Taylor & Francis, 2003. 592 p.
6. Grugel R., Cotton L., Segre P., Ogle J., Funkhouser G., Parris F., Murphy L., Gillies D., Hua F., Anilkumar A. The In-Space Soldering Investigation (ISSI): Melting and Solidification Experiments Aboard the International Space Station // 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. 2006. P. 1–8. DOI: 10.2514/6.2006-521
7. Flom Y. Electron beam brazing of titanium for construction in space // Brazing and soldering: proceedings of the 3rd International Brazing and Soldering Conference. San Antonio, Texas, USA, April 24–26, 2006. 2006. P. 5.
8. Сумм Б.Д., Горюнов Ю.В. Физико-химические основы смачивания и растекания. М.: Химия, 1976. 232 с.
9. Улитин М.В., Филиппов Д.В., Федорова А.А. Поверхностные явления. Адсорбция. Иваново: Ивановский государственный химико-технологический ун-т, 2014. 206 с.
10. Балашов В.А., Савенков Е.Б. Квазигидродинамическая система уравнений для описания течений многофазной жидкости с учетом поверхностных эффектов // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2015. № 75. С. 1–37.
11. Балашов В.А., Савенков Е.Б. О численном алгоритме для расчета двумерных двухфазных течений с учетом эффекта смачивания на основе квазигидродинамической регуляризации // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2018. № 62. С. 1–36. DOI: 10.20948/prepr-2018-62
12. Алимов М.М., Корнев К.Г. Внешний мениск на тонком волокне с овоидальным профилем (случай полного смачивания) // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2017. № 4. С. 97–112. DOI: 10.7868/S0568528117040090
13. Навеев П.Т., Симхадри Р.Р., Ранджит С.К. Совместное влияние температуры капли и смачиваемости поверхности на динамику столкновения отдельной капли // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2020. № 5. С. 65–78. DOI: 10.31857/S0568528120040088
14. Fu H., Dehsara M., Krivilyov M., Mesarovic S.D., Sekulic D.P. Kinetics of the molten Al–Si triple line movement during a brazed joint formation // Journal of Materials Science. 2016. Vol. 51, no. 4. P. 1798–1812. DOI: 10.1007/s10853-015-9550-7
15. Груздь С.А., Кривилев М.Д., Самсонов Д.С. Математическая модель процесса смачивания вертикальной стенки при пайке твердым припоем сколов и трещин космических аппаратов // Космонавтика и ракетостроение. 2022. № 2. С. 66–74.
16. Gruzd S.A., Krivilyov M.D., Samsonov D.S., Wu Y., Sekulic D.P., Mesarovic S.D. Non-isothermal Wetting of an Al Alloy Pin by Al–Si Melt under Terrestrial and Microgravity Conditions // Microgravity Science and Technology. 2022. Vol. 34, no. 4. 65. DOI: 10.1007/s12217-022-09973-0
17. Wu Y., Lazaridis K., Krivilyov M.D., Mesarovic S.D., Sekulic D.P. Effects of gravity on the capillary flow of a molten metal // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2023. Vol. 656. 130400. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2022.130400

18. COMSOL Multiphysics, Version 5.6, License n. 9602304. 2021
19. Sun P., Liu C., Xu J. Phase Field Model of Thermo-Induced Marangoni Effects in the Mixtures and its Numerical Simulations with Mixed Finite Element Method // Communications in Computational Physics. 2009. Vol. 6, no. 5. P. 1095–1117.
20. Liu H., Zhang Y. Phase-field modeling droplet dynamics with soluble surfactants // Journal of Computational Physics. 2010. Vol. 229. P. 9166–9187. DOI: 10.1016/j.jcp.2010.08.031
21. Ding H., Speltz P.D.M. Wetting condition in diffuse interface simulations of contact line motion // Physical Review E. 2007. Vol. 75. 046708. DOI: 10.1103/PhysRevE.75.046708
22. Alexandrov D.V., Galenko P.K. Selection criterion of stable dendritic growth at arbitrary Péclet numbers with convection // Physical Review E. 2013. Vol. 87. 062403. DOI: 10.1103/PhysRevE.87.062403
23. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974. 712 с.
24. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М.: Энергия, 1975. 488 с.
25. Egly I., Ricci E., Novakovic R., Ozawa S. Surface tension of liquid metals and alloys — Recent developments // Advances in Colloid and Interface Science. 2010. Vol. 159. P. 198–212. DOI: 10.1016/j.cis.2010.06.009

Сведения об авторах:

Груздь Светлана Анатольевна (корр.), кфмн. нс, Удмуртский государственный университет (УдГУ), 426034, г. Ижевск, ул. Университетская, д. 1; e-mail: li1yna@mail.ru; ORCID: 0000-0001-7754-2340

Самсонов Дмитрий Сергеевич, асп., УдГУ; e-mail: mdhouse@bk.ru; ORCID: 0009-0006-1547-2774

Кривилев Михаил Дмитриевич, дфмн, внс, Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН (УдмФИЦ УрО РАН), 426067, г. Ижевск, ул. Татьяны Барамзиной, д. 34; e-mail: mk@udsu.ru; ORCID: 0000-0002-0239-2883

Research article

Mathematical model of solder flow in a vertical tube at different gravity levels taking into account the wetting and melting processes

S.A. Gruzd¹, D.S. Samsonov¹, M.D. Krivilyov^{1,2}

¹ Udmurt State University, Izhevsk, Russian Federation

² Udmurt Federal Research Center, Ural Branch of RAS, Izhevsk, Russian Federation

The motion of a solder inside a ceramic tube with an aluminum insert is considered using the phase-field model of multiphase flows. The problem is solved in the non-isothermal formulation, which allows analyzing the two-phase flow dynamics and the kinetics of the contact line driven by wetting. The total time required for the solder to heat up, melt and then move inside the tube is calculated accounting for its position in the insert and action of wetting forces. The melting heat of the solder is taken into account in the system through the introduction of effective heat capacity as a function of temperature. The values of the dimensionless Bond, Rayleigh, Grashof and Marangoni numbers are calculated, which made it possible to analyze the contribution of various physical phenomena to the behavior of the system. It was found that the effect of gravity forces on the shape of the upper and lower free surfaces of the melt is not significant because of the small weight of the solder and the small diameter of the tube. The graphs showing the variation in the center of mass of the solder are obtained. The model predicts the solder leakage from the insert in the presence of gravity, while under microgravity this does not happen. The velocity fields, which develop in a liquid solder at the gravity levels of 1g and μ g, are analyzed. Under microgravity conditions, the maximum velocities are caused by the movement of the melt due to wetting forces, while in Earth gravity the average velocities are two orders of magnitude higher since convection currents are present near the walls of the tube. A small thermocapillary effect on the average flow velocity was noted as a result of low temperature gradients.

Keywords: two-phase flow, surface tension, solder melting, wetting contact angle, gravity, mathematical model

Received: 30.05.2024 / **Published online:** 30.12.2024

References

1. Novosadov V.S. Adgeziya i yeye rol' v payke (Analiticheskiy obzor). Payka-2021: sbornik materialov mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Tol'yatti, 2023. P. 106–139.
2. Krasnov E.I., Kurbatkina E.I., Shavnev A.A., Serpova V.M., Zhabin A.N. Application of the active brazing method for connecting fiber materials with ceramic materials (review). Proceedings of VIAM. 2020. No. 10. P. 63–72. DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-10-63-72
3. Leonov V.A. Permanent lunar station as Russia's priority in space resources development. Aerospace Sphere Journal. 2021. No. 4. P. 56–67. DOI: 10.30981/2587-7992-2021-109-4-56-67
4. Dreeva N.A., Zemlina A.S. Lunar habitat station: power station and communication equipment. Current scientific research in the modern world. 2021. 10–10(78). P. 41–43.

5. *Paton B.E.* Space: Technologies, Materials, and Structures. London: Taylor & Francis, 2003. 592 p.
6. *Grugel R., Cotton L., Segre P., Ogle J., Funkhouser G., Parris F., Murphy L., Gillies D., Hua F., Anilkumar A.* The In-Space Soldering Investigation (ISSI): Melting and Solidification Experiments Aboard the International Space Station. 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. 2006. P. 1–8. DOI: 10.2514/6.2006-521
7. *Flom Y.* Electron beam brazing of titanium for construction in space. Brazing and soldering: proceedings of the 3rd International Brazing and Soldering Conference. San Antonio, Texas, USA, April 24-26, 2006. 2006. P. 5.
8. *Summ B.D., Goryunov Y.V.* Fiziko-khimicheskiye osnovy smachivaniya i rastekaniya. Moscow: Khimiya, 1976. 232 p.
9. *Ulitin M.V., Filippov D.V., Fedorova A.A.* Poverkhnostnyye yavleniya. Adsorbtsiya. Ivanovo: Ivanovskiy gosudarstvennyy khimiko-tehnologicheskii un-t, 2014. 206 p.
10. *Balashov V.A., Savenkov E.B.* Quasihydrodynamic equations for diffuse interface type multiphase flow model with surface effects. Keldysh Institute Preprints. 2015. No. 75. P. 1–37.
11. *Balashov V.A., Savenkov E.B.* About numerical algorithm for simulation of two-dimensional two-phase flows with wetting effect based on quasi-hydrodynamic regularization. Keldysh Institute Preprints. 2018. No. 62. P. 1–36. DOI: 10.20948/prepr-2018-62
12. *Alimov M.M., Kornev K.G.* An external meniscus on a thin ovoidal fiber (the case of full wetting). Fluid Dynamics. 2017. Vol. 52. P. 547–560. DOI: 10.1134/S0015462817040093
13. *Naveen P.T., Simhadri R.R., Ranjith S.K.* Simultaneous Effect of Droplet Temperature and Surface Wettability on Single Drop Impact Dynamics. Fluid Dynamics. 2020. Vol. 55. P. 640–652. DOI: 10.1134/S0015462820040084
14. *Fu H., Dehsara M., Krivilyov M., Mesarovic S.D., Sekulic D.P.* Kinetics of the molten Al–Si triple line movement during a brazed joint formation. Journal of Materials Science. 2016. Vol. 51, no. 4. P. 1798–1812. DOI: 10.1007/s10853-015-9550-7
15. *Gruzd S.A., Krivilyov M.D., Samsonov D.S.* Mathematical model of wetting of a vertical wall during brazing for hard soldering of spacecraft chips and cracks. Cosmonautics and rocket engineering. 2022. No. 2. P. 66–74.
16. *Gruzd S.A., Krivilyov M.D., Samsonov D.S., Wu Y., Sekulic D.P., Mesarovic S.D.* Non-isothermal Wetting of an Al Alloy Pin by Al–Si Melt under Terrestrial and Microgravity Conditions. Microgravity Science and Technology. 2022. Vol. 34, no. 4. 65. DOI: 10.1007/s12217-022-09973-0
17. *Wu Y., Lazaridis K., Krivilyov M.D., Mesarovic S.D., Sekulic D.P.* Effects of gravity on the capillary flow of a molten metal. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2023. Vol. 656. 130400. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2022.130400
18. COMSOL Multiphysics, Version 5.6, License n. 9602304. 2021
19. *Sun P., Liu C., Xu J.* Phase Field Model of Thermo-Induced Marangoni Effects in the Mixtures and its Numerical Simulations with Mixed Finite Element Method. Communications in Computational Physics. 2009. Vol. 6, no. 5. P. 1095–1117.
20. *Liu H., Zhang Y.* Phase-field modeling droplet dynamics with soluble surfactants. Journal of Computational Physics. 2010. Vol. 229. P. 9166–9187. DOI: 10.1016/j.jcp.2010.08.031
21. *Ding H., Spelt P.D.M.* Wetting condition in diffuse interface simulations of contact line motion. Physical Review E. 2007. Vol. 75. 046708. DOI: 10.1103/PhysRevE.75.046708
22. *Alexandrov D.V., Galenko P.K.* Selection criterion of stable dendritic growth at arbitrary Péclet numbers with convection. Physical Review E. 2013. Vol. 87. 062403. DOI: 10.1103/PhysRevE.87.062403
23. *Schlichting H.* Boundary Layer Theory. New York: McGraw-Hill, 1979. 817 p.
24. *Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S.* Teploperedacha. Moscow: Energiya, 1975. 488 p.
25. *Egry I., Ricci E., Novakovic R., Ozawa S.* Surface tension of liquid metals and alloys — Recent developments. Advances in Colloid and Interface Science. 2010. Vol. 159. P. 198–212. DOI: 10.1016/j.cis.2010.06.009