

УДК 531.66;532.696

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ И ТЕМПЕРАТУРНОГО УСЛОВИЯ АДГЕЗИИ В МОДЕЛИ «КАПЛЯ РАСПЛАВА – ПОДЛОЖКА»

Колесникова Елена Александровна,

аспирант каф. теплогазоснабжения Инженерно-экологического факультета
Томского государственного архитектурно-строительного университета,
Россия, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2. E-mail: alko.gm@gmail.com

Актуальность работы обусловлена совершенствованием технологии нанесения термических покрытий и методов определения оптимальных характеристик технологического процесса.

Цель работы: определение температурных полей и температурных условий адгезии в модели «капля расплава – подложка» при образовании между ними металлической связи.

Методы исследования: построение оригинальной математической модели температурных полей и температурного условия, соответствующих достижению адгезии в системе «капля-подложка»; экспериментальная проверка результатов, полученных по предложенной модели.

Результаты. Представлен метод определения температурных полей в системе «капля-подложка», основанный на выравнивании температур малых соседних кубических объемов. Метод основан на положении, что нестационарный процесс передачи тепла приближается к стационарному процессу при уменьшении временных и размерных интервалов. В предложенном методе не используются дифференциальные уравнения. Расчет нестационарного температурного поля проводится на основе уравнений передачи тепла для стационарного режима. Для начальной контактной температуры при известных для неё величинах теплопроводности, теплоемкости и плотности металлов капли и подложки получено расчетное температурное условие, определяющее наличие или отсутствие адгезии капли. Определено, что условием наличия адгезии является плавление материала подложки под каплей. Плавление части поверхности под каплей соответствует неполной адгезии, плавление всей поверхности подложки под ней соответствует максимальной адгезии. Температурное условие адгезии справедливо при отсутствии образования интерметаллида между материалом капли и подложки. Адекватность температурного условия адгезии подтверждается наличием и отсутствием адгезии при осаждении на оловянную и свинцовую подложки каплю олова и свинца.

Ключевые слова:

Адгезия, капля, расплав, подложка, контактная температура, температура плавления, температурное поле.

Введение

Технология высокотемпературного нанесения порошковых покрытий широко применяется в промышленном производстве [1–4]. Совершенствование применяемых технологий и разработка эффективных приемов нанесения порошковых покрытий требуют поддержания оптимальных условий данного процесса. Также важной задачей является определение и обеспечение требуемых условий достижения качественной адгезии покрытия [1, 5–15], а одним из параметров процесса – глубина плавления подложки под покрытием. Чрезмерный перегрев капли и подложки может являться причиной чрезмерной глубины плавления поверхностного слоя подложки и нежелательного изменения структуры материалов.

Каждая закрепившаяся на поверхности капля является структурной единицей покрытия. Если закрепившаяся капля соответствует технологическому требованию, то можно ожидать его выполнения для характеристики всего покрытия. По этой причине в последние десятилетия теоретическим и экспериментальным исследованиям этой темы посвящено большое количество работ [1–21]. В связи со сложностью и высокой стоимостью экспериментальных исследований значительное внимание уделяется численному моделированию взаимодействия в системе «капля-подложка» [1, 4]. Для описания капли, растекающейся по поверхности, предложены физические и математические модели ее деформации и затвердевания [5–21]. Выявлены и проанализированы основные факторы, влия-

ющие на адгезию капли к подложке. Однако не все связи между этими факторами имеют однозначные объяснения [5–15]. В результате процесс получения адгезии в системе «капля-подложка», несмотря на серьезное внимание к нему, затруднительно включать в математические модели.

За последние два десятилетия в численном моделировании процесса взаимодействия капли с подложкой достигнуты значительные успехи [1, 16–21], требующие, однако, существенных временных и ресурсных затрат [1]. Несмотря на это, актуальным остается необходимость определения параметров термического нанесения покрытий.

Постановка задачи

Целью данной работы является описание методики определения температурных полей для системы «капля-подложка» методом выравнивания малых соседних кубических объемов и определение температурного условия адгезии в системе «капля-подложка».

Методика определения нестационарного температурного поля методом выравнивания температур малых соседних кубических объемов

Основанием метода служит положение о том, что передача тепла приближена к стационарному процессу, когда расчет проводится для малых временных и размерных интервалов [22]. Чем меньше рассматриваемые интервалы времени и пространства, для которых рассчитывается тепловой про-

цесс, тем больше нестационарный процесс теплопередачи приближается к стационарному процессу.

При определении нестационарного теплового поля проводится разбивка капли и подложки на малые кубические объемы. Выравнивание температур в двух малых смежных объемах тем точнее соответствует реальному процессу теплопроводности, чем меньше рассматриваемые кубические объемы. Процесс передачи тепла между парами смежных объемов рассчитывается по уравнению Фурье, соответствующему стационарному процессу теплопередачи, а также закону сохранения энергии [22].

$$\Delta Q_1 = \frac{\lambda(T_2 - T_1)\Delta t S}{\Delta l},$$

$$\Delta Q_2 = c\rho S\Delta l(T_2 - T_1),$$

$$\Delta Q_1 = \Delta Q_2,$$

где ΔQ_1 – количество теплоты, которое за время Δt проходит через приповерхностный слой материала Δl при неизменных температурах на границах этого участка T_1 и T_2 ; λ , ρ , c – теплопроводность, плотность и удельная теплоемкость материала соответственно; ΔQ_2 – количество теплоты, которое проходит через площадь поверхности S .

Для определения температурного поля при постоянных величинах теплопроводности λ и теплоемкости c подложка и капля разбиваются на одинаковые объемы с длиной ребра куба Δl . Выров-

ненная температура смежных кубических объемов T_3 в данном случае определяется выражением:

$$T_3 = \frac{T_2 + T_1}{2}.$$

Процесс передачи тепла при стационарном режиме между смежными кубическими объемами изотропной однородной среды схематически показан на рис. 1. За время $\Delta t = (c\rho\Delta l^2)/\lambda$ тепло, равное $\Delta Q = c\rho\Delta l^3(T_2 - T_1)$, переходит из всего первого объема во второй.

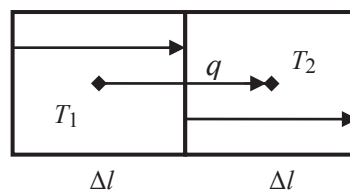


Рис. 1. Передача тепла между смежными кубическими объемами изотропной однородной среды в стационарном режиме

Fig. 1. Heat transfer between adjacent cubic volumes of isotropic homogeneous medium in steady-state conditions

Рассмотрим передачу тепла в столбике, составленном из малых кубических объемов. На рис. 2 представлены графики изменения температур рассматриваемых малых смежных кубических объемов в разные интервалы времени.

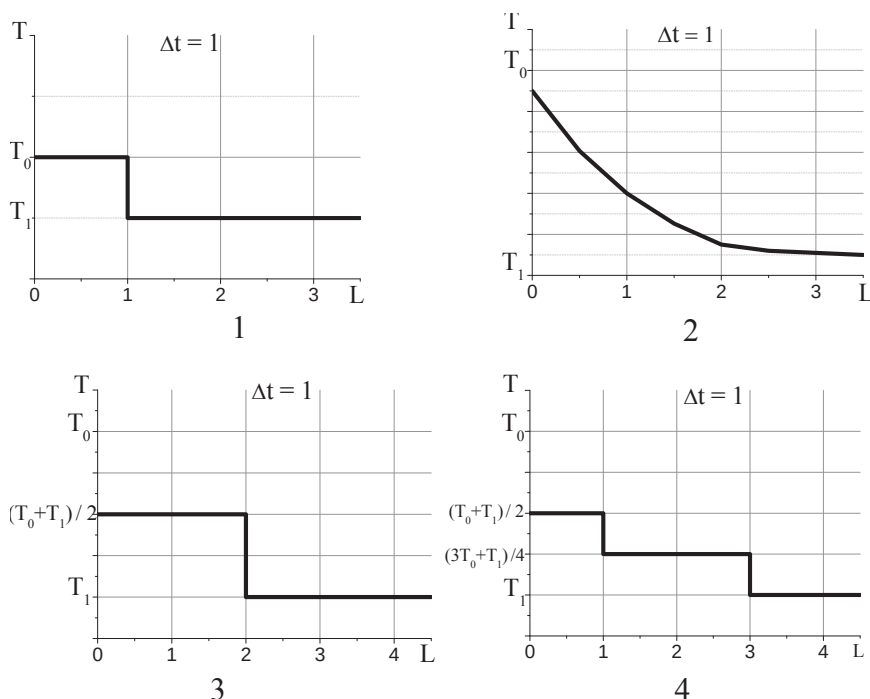


Рис. 2. Графики изменения температур T малых смежных объемов длиной $l=1$ в интервалы времени $\Delta t=0$ и $\Delta t=1$. 1 – температуры смежных объемов в начальный момент времени; 2 – фактические температуры смежных объемов в момент времени $\Delta t=1$; 3 – промежуточная температура смежных объемов в момент времени $\Delta t=1$, рассчитанная по предложенному методу выравнивания температур; 4 – конечная температура смежных объемов в момент времени $\Delta t=1$, рассчитанная по предложенному методу выравнивания температур

Fig. 2. Temperature T curves of small adjacent volumes with the length of $l=1$ in time intervals $\Delta t=0$ and $\Delta t=1$. 1 are the temperatures of adjacent volumes at the initial time; 2 are actual temperatures of adjacent volumes at $\Delta t=1$; 3 is the intermediate temperature of adjacent volumes at $\Delta t=1$, calculated by the proposed equalization temperature technique; 4 is the final temperature of adjacent volumes at $\Delta t=1$, calculated by the proposed equalization temperature technique

На рис. 2 (2) показано распределение температур, отражающее реальный процесс передачи тепла. На рис. 2 (3, 4) представлен процесс передачи тепла по модели, используемой в предложенном методе расчета температурного поля. Из рисунков видно, что в реальном процессе за время Δt тепло из первого объема поступает не только в смежный объем, но и в следующие за ним объемы. В предложенной модели тепло за время Δt поступает только в смежный объем, не выходя за его пределы. При этом разность температур между вторым и третьим объемами получается больше, чем в реальном процессе. Следовательно, согласно уравнению передачи тепла в стационарном режиме, скорость передачи тепла в модели из второго объема в третий больше этой скорости в реальном процессе теплопередачи. Таким образом, отставание передачи тепла по расстоянию в модели компенсируется увеличением скорости передачи тепла за счет превышения температурного перепада над реальной разницей температур.

При плавлении и затвердевании материала используется уравнение теплоты плавления:

$$\Delta Q = q \Delta l \rho,$$

где ΔQ – количество теплоты, получаемое веществом при плавлении (выделившееся при кристаллизации); q – удельная теплота плавления.

За единичный момент времени в единичный объем поступает определенное количество теплоты. Приращение температуры соответствует поступившему в единичный объем количеству теплоты. Величина приращения температуры, эквивалентная теплоте плавления единичного объема, определяется уравнением:

$$\Delta T = q/c,$$

где q – теплота плавления; c – удельная теплоемкость при температуре плавления.

Единичный кубический объем является расплавленным, когда количество поглощенного тепла достигнет величины ΔT . Аналогичным образом рассчитывается процесс кристаллизации единичных объемов в единичные интервалы времени.

Для случая с переменными величинами λ и c тепло, распространяемое за равные промежутки времени Δt , преодолевает различные расстояния Δl . По этой причине для использования предложенного метода при переменных теплоемкости и теплопроводности необходимо из равных малых кубических объемов с длиной ребра Δl сформировать столбики из кубических объемов длиной $\delta l n_i$, которые будут соответствовать распространению тепла за один расчетный интервал времени $\delta l n_i$. Схематическое изображение объединения кубических объемов в столбики с одинаковой теплопроводностью показано на рис. 3.

Точность расчета тем выше, чем больше начальная разбивка капли и подложки по толщине (т. е. меньше исходный отрезок $\delta l n_{\min}$).

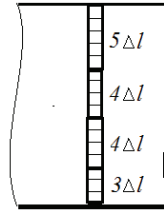


Рис. 3. Схематическое изображение объединения кубиков в столбики с одинаковой теплопроводностью

Fig. 3. Diagram of blocks combination into columns with equal thermal conductivity

Количество кубических объемов в группе определяется величиной теплопроводности при данном интервале температур. Оптимальное количество кубических объемов в столбике $n_{\min}$ определяется минимальной величиной теплопроводности $\lambda_{\min}$ и заданной погрешностью, вносимой изменением теплопроводности. Для каждого температурного диапазона относительно выбранного числа $n_{\min}$ рассчитывается число кубов n_i в столбике в соответствии с λ_i . Число кубических объемов n_i в столбике определяется по формуле:

$$n_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_{\min}} n_{\min},$$

где $n_{\min}$, $\lambda_{\min}$ – минимальное количество кубических объемов Δl в группе и соответствующая этой группе минимальная теплопроводность; n_i , λ_i – количество кубических объемов с ребром Δl и теплопроводность в i -м столбике; i – номер температурного диапазона (столбик кубических объемов).

Выравниваемая температура двух смежных столбиков в случае переменной теплоемкости и теплопроводности определяется выражением:

$$T_{n(i), n(i+1)} = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n(i)} c_{n(i)} T_{n(i)} + \sum_{i=1}^{n(i+1)} c_{n(i+1)} T_{n(i+1)} \right)}{\left(\sum_{i=1}^{n(i)} c_{n(i)} + \sum_{i=1}^{n(i+1)} c_{n(i+1)} \right)},$$

где $c_{n(i)}$, $c_{n(i+1)}$ – теплоемкость каждого кубического объема в i -м и $(i+1)$ столбике; $T_{n(i)}$, $T_{n(i+1)}$ – температура куба в i -м и $(i+1)$ столбиках; n_i , n_{i+1} – количество кубов в i -м и $(i+1)$ столбиках.

Достоверность предложенного метода подтверждена результатами сравнения расчета тестовых задач по определению температурного поля в бесконечной пластине, бесконечном цилиндре и шаре [22, 23], а также соответствием расчета изменения температуры стальной пластины во времени результатам эксперимента [24].

Температурное условие адгезии капли на подложке

Адгезия наносимых на поверхность частиц является важным процессом в технологии нанесения порошковых покрытий на различные конструкционные материалы. Существует несколько теорий: адсорбционная, механическая, электрическая, электронная, диффузионная и химическая, описывающих явление адгезии с различных сто-

рон [1, 3, 5, 25]. Каждая из них находит подтверждение в результатах численных и экспериментальных исследований.

Однако до настоящего времени эти теории не позволяют получить математическое выражение температурного условия адгезии, то есть рассчитать начальные температуры капли и подложки для конкретных случаев. В настоящей работе определяются температурные условия, необходимые для возникновения адгезионной связи капель расплава металла с поверхностью металлической подложки при условии отсутствия образования интерметаллидов. Так как связь между атомами в решетке интерметаллидов становится ионной, или ковалентной, то почти все интерметаллиды хрупки и их появление в упрочняющем или защитном покрытии нежелательно. По этой причине для защитных и упрочняющих покрытий используются покрытия, не образующие интерметаллидных соединений.

Известно, что при контакте капли металла с подложкой контактный слой подложки плавится с дальнейшей кристаллизацией смеси расплавов капли и подложки [1, 3, 5, 25]. При этом происходит взаимодействие материалов с образованием металлической связи, которая обеспечивает адгезию между двумя металлами. Время взаимодействия расплавленной капли с поверхностью до ее кристаллизации мало по сравнению со временем, необходимым для протекания диффузионного процесса, обеспечивающего адгезию. По этой причине вклад диффузионного процесса в адгезию при напылении частиц, размер которых обычно не превышает десятки микрон, пренебрежимо мал.

Температурное условие начала адгезии основано на требовании плавления граничного слоя подложки под каплей. Максимальная адгезия достигается при плавлении всей поверхности подложки под каплей. Плавление части поверхности под каплей соответствует неполной адгезии [23].

Основным параметром процесса, определяющим образование прочной металлической связи между осаждаемой частицей и подложкой, является температура в зоне контакта. Для определения температурного условия адгезии введем понятие критериальной контактной температуры. Значение критериальной контактной температуры T_k соответствует температуре контактного слоя, пока оно не превысит температуру плавления материала подложки T_m . Величина контактной температуры перестает соответствовать критериальной контактной температуре T_k после превышения ей температуры плавления подложки T_m . Выражение для критериальной контактной температуры T_k получено из теплового баланса между граничными слоями капли и подложки без учета плавления материала подложки

$$T_1 c_1 \rho_1 S l_1 + T_2 c_2 \rho_2 S l_2 = T_k (c_1 \rho_1 S l_1 + c_2 \rho_2 S l_2) \quad (1)$$

и стационарных уравнений теплопередачи

$$\begin{aligned} Q_1 &= (\lambda_1 (T_1 - T_2) S \Delta t) / l_1, \\ Q_2 &= (\lambda_2 (T_1 - T_2) S \Delta t) / l_2, \\ Q_1 &= Q_2, \end{aligned} \quad (2)$$

где S – площадь контакта; λ – теплопроводности; c – теплоемкости; ρ – плотности капли и подложки соответственно; l – толщины прилегающих к зоне контакта тонких слоев материала капли и подложки, соответствующие передаче тепла Q за время Δt . Здесь и далее индекс 1 относится к капле, а индекс 2 соответствует подложке.

Из (2) получаем соотношение

$$l_1 / l_2 = \lambda_1 / \lambda_2.$$

Тогда выражение для критериальной контактной температуры T_k имеет вид:

$$T_k = (n T_1 + T_2) / (n + 1), \quad (3)$$

где $n = \frac{\rho_1 c_1 \lambda_1}{\rho_2 c_2 \lambda_2}$ – безразмерный параметр.

Использование выражений (1), (2), описывающих стационарный процесс теплопередачи, для нестационарного процесса в начальный момент контакта капли и подложки допускается по причине того, что при малом временном интервале процесс передачи тепла в контактной зоне близок к стационарному процессу.

Разделив обе части уравнения (3) на температуру плавления материала подложки T_m , получаем выражение для определения температурных условий возникновения адгезии в безразмерном виде:

$$T_k / T_m = 1 / (n + 1) (n T_1 / T_m + T_2 / T_m), \quad (4)$$

где T_m – температура плавления подложки; T_k / T_m , T_1 / T_m , T_2 / T_m – критериальная контактная температура, температура расплавленной капли и температура подложки в безразмерном виде соответственно.

Для получения качественной адгезии величина T_k / T_m должна быть больше единицы. В этом случае расчетная контактная температура T_k превышает температуру плавления подложки, что соответствует началу ее плавления в области контакта. Таким образом, если значение T_k / T_m превышает 1, то наблюдается адгезия капли. Большее превышение единичного значения критерия соответствует большей глубине проплавления подложки. Значение $T_k / T_m \leq 1$ соответствует отсутствию плавления подложки под каплей, а следовательно, и отсутствию адгезии.

Используя полученные температурные условия адгезии, были построены расчетные зависимости температуры капли T_1 от температуры подложки T_2 , определяющие границу адгезии, и рассчитано условие адгезии в размерном и безразмерном видах для пар капля–подложка из одинаковых и разнородных материалов. В качестве материала капли и подложки в работе рассматривались олово и свинец с относительно низкой температурой плавления. Они не используются в качестве упрочняю-

щих покрытий, однако эти материалы имеют низкие температуры плавления и их использование в экспериментальных исследованиях значительно снижает трудности и погрешности при температурных измерениях. Это позволяет получить достоверные данные, составляющие физическую основу рассматриваемой задачи, которые можно перенести на более тугоплавкие материалы.

Для пар капля–подложка из одинаковых материалов олово–олово и свинец–свинец вследствие равной теплопроводности выравнивание температуры в зоне контакта происходит на одинаковую глубину, как в сторону капли, так и в сторону подложки. Схематично слои капли и подложки из одного материала с выровненной температурой в зоне контакта представлены на рис. 4. В начальный интервал времени взаимодействия температура в зоне контакта капли и подложки выравнивается на одинаковые расстояния от границы, т. е. $l_1 = l_2$.

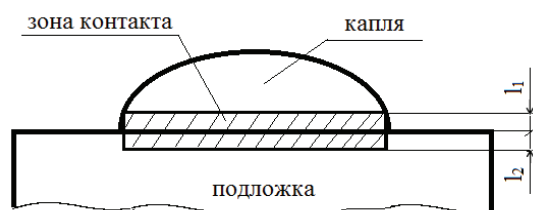


Рис. 4. Схема области выравнивания температур капли и подложки из одного материала в начальный интервал времени. Зона контакта капли и подложки соответствует заштрихованной части

Fig. 4. Diagram of temperature equalization region of a drop and substrate of the same material at the initial time. Drop and substrate contact area corresponds to the dashed part

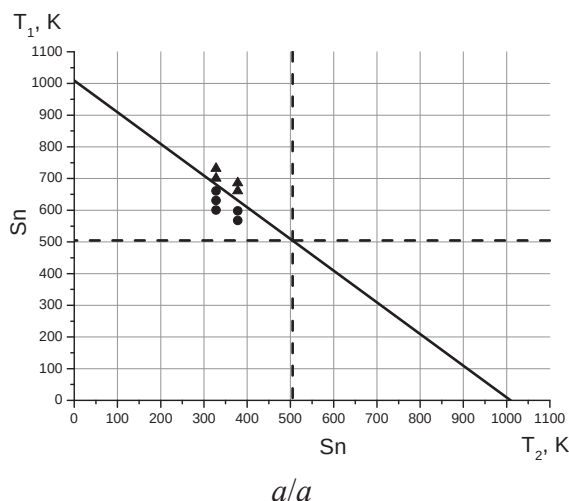


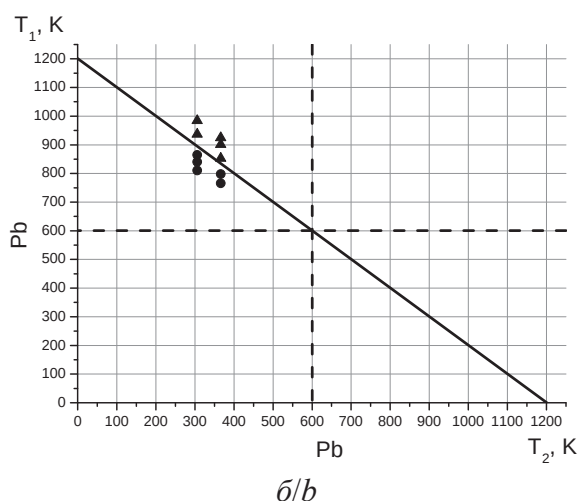
Рис. 5. Графики расчетных зависимостей температуры капли T_1 от температуры подложки T_2 , определяющей границу адгезии и экспериментальные точки для пар капля–подложка: а) олово–олово; б) свинец–свинец

Fig. 5. Graphs of drop temperature T_1 calculated dependences on substrate temperature T_2 which determine the adhesion boundary and experimental points for pairs: а) Sn–Sn; б) Pb–Pb

При расчете критерия адгезии теплопроводности, теплоемкости и плотности олова для его жидкой и твердой фазы принимались равными $\lambda_{\text{Sn(l)}} = 34,3 \text{ Вт/(м·К)}$, $c_{\text{Sn(l)}} = 226 \text{ Дж/(кг·К)}$, $\rho_{\text{Sn(l)}} = 6990 \text{ кг/м}^3$, $\lambda_{\text{Sn(s)}} = 60 \text{ Вт/(м·К)}$, $c_{\text{Sn(s)}} = 226 \text{ Дж/(кг·К)}$, $\rho_{\text{Sn(s)}} = 7290 \text{ кг/м}^3$. Для жидкой и твердой фаз свинца эти параметры принимались равными $\lambda_{\text{Pb(l)}} = 15,8 \text{ Вт/(м·К)}$, $c_{\text{Pb(l)}} = 141,5 \text{ Дж/(кг·К)}$, $\rho_{\text{Pb(l)}} = 10645 \text{ кг/м}^3$ и $\lambda_{\text{Pb(s)}} = 28,14 \text{ Вт/(м·К)}$, $c_{\text{Pb(s)}} = 130 \text{ Дж/(кг·К)}$, $\rho_{\text{Pb(s)}} = 11005 \text{ кг/м}^3$ соответственно. Температура плавления свинца T_{Pb} и олова T_{Sn} равны $T_{\text{Pb}} = 600,5 \text{ К}$ и $T_{\text{Sn}} = 504,9 \text{ К}$ соответственно [26]. На рис. 5 приведены графики прямых, соответствующих расчетным критериям адгезии.

Точки, находящиеся выше прямых, должны соответствовать наличию адгезии капель на подложке. Для точек, находящихся ниже прямых, адгезия должна отсутствовать. Точки, лежащие на самой расчетной зависимости, могут соответствовать отсутствию, наличию или частичной адгезии. Вертикальной пунктирной линии соответствует безразмерная температура плавления подложки, горизонтальной пунктирной линии – безразмерная температура плавления капли.

На рис. 6 для этих же пар материалов (а) Sn–Sn, б) Pb–Pb) представлены графики безразмерных расчетных зависимостей температуры капли T_1/T_s от безразмерной температуры подложки T_2/T_s , определяющие границу адгезии, где T_1 , T_2 – температуры капли и подложки соответственно; T_s – температура плавления подложки. Вертикальной пунктирной линии соответствует безразмерная температура плавления подложки, горизонтальной – безразмерная температура плавления капли.



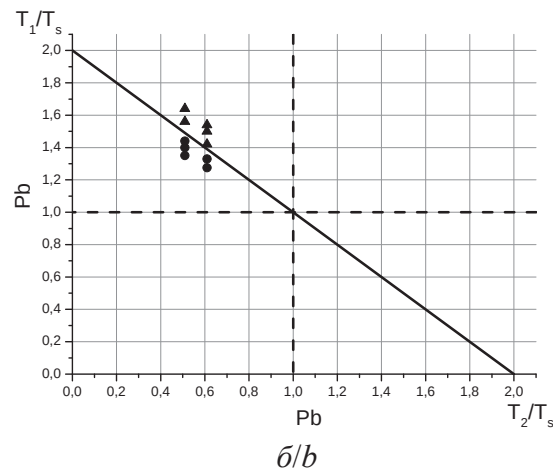
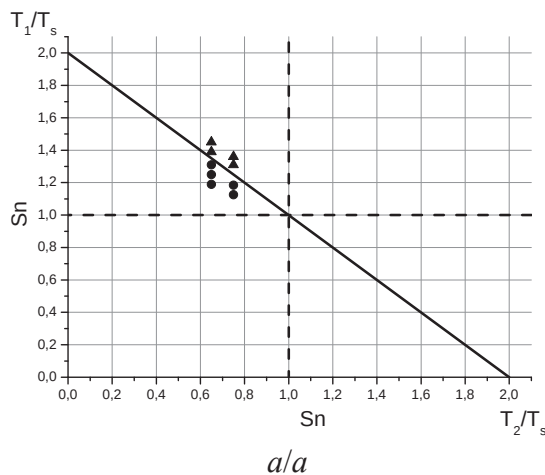


Рис. 6. Графики безразмерных расчетных зависимостей безразмерной температуры капли T_1/T_s от безразмерной температуры подложки T_2/T_s , определяющей границу адгезии и экспериментальные точки для пар: а) олово-олово; б) свинец-свинец

Fig. 6. Graphs of nondimensional calculated dependences of dimensionless drop temperature T_1/T_s on dimensionless substrate temperature T_2/T_s which determines the adhesion boundary and experimental points for pairs: а) Sn-Sn; б) Pb-Pb

Проведен расчет температурного условия адгезии для пар расплавленная капля – подложка из разнородных материалов: свинцовая капля – оловянная подложка (Pb-Sn) и оловянная капля – свинцовая подложка (Sn-Pb). Для материалов с различными коэффициентами теплопроводности λ выравнивание температуры в зоне контакта у капли и подложки происходит на различных расстояниях, пропорциональных их величинам теплопроводности: $\frac{l_1}{l_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$. Схематично слои с выровнен-

ной температурой в зоне контакта для оловянной капли и свинцовой подложки показаны на рис. 7, а для свинцовой капли и оловянной подложки представлены на рис. 8. Зона контакта капли и подложки соответствует заштрихованной части.

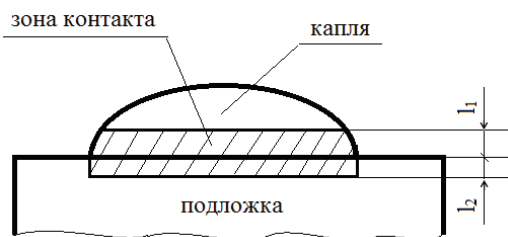


Рис. 7. Схема области выравнивания температур оловянной капли и свинцовой подложки в начальный интервал времени. Зона контакта капли и подложки соответствует заштрихованной части

Fig. 7. Diagram of temperature equalization region of a tin drop and a lead substrate at the initial time. Drop and substrate contact area corresponds to the dashed part

Из рис. 7 видно, что толщина граничного слоя оловянной капли, в котором происходит выравнивание температуры, больше толщины соответствующего слоя свинцовой подложки, тогда как в случае свинцовой капли и оловянной подложки

(рис. 8) толщина граничного слоя подложки с выровненной температурой больше толщины соответствующего слоя капли.

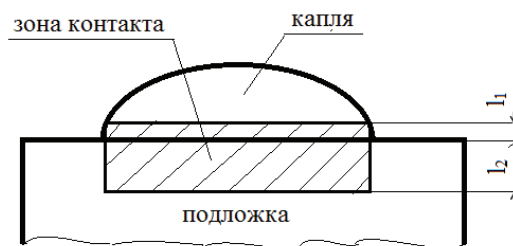


Рис. 8. Схема области выравнивания температур свинцовой капли и оловянной подложки в начальный интервал времени. Зона контакта капли и подложки соответствует заштрихованной части

Fig. 8. Diagram of temperature equalization region of a lead drop and a tin substrate at the initial time. Drop and substrate contact area corresponds to the dashed part

Минимальные температуры капли и подложки для пар Sn-Pb и Pb-Sn, соответствующие появлению адгезии, определялись из выражений теплового баланса между граничными слоями капли и подложки. Выровненная температура граничных слоев капли олова и свинцовой подложки T_{Sn-Pb}^* , а также свинцовой капли и оловянной подложки T_{Pb-Sn}^* определялись выражениями:

$$T_{Sn-Pb}^* = \frac{c_{Sn(l)} \rho_{Sn(l)} T_{Sn(l)} + c_{Pb(s)} \rho_{Pb(s)} \frac{\lambda_{Pb(s)}}{\lambda_{Sn(l)}} T_{Pb(s)}}{c_{Sn(l)} \rho_{Sn(l)} + \rho_{Pb(s)} c_{Pb(s)} \frac{\lambda_{Pb(s)}}{\lambda_{Sn(l)}}},$$

$$T_{Pb-Sn}^* = \frac{c_{Pb(l)} \rho_{Pb(l)} T_{Pb(l)} + c_{Sn(s)} \rho_{Sn(s)} \frac{\lambda_{Sn(s)}}{\lambda_{Pb(l)}} T_{Sn(s)}}{c_{Pb(l)} \rho_{Pb(l)} + \rho_{Sn(s)} c_{Sn(s)} \frac{\lambda_{Sn(s)}}{\lambda_{Pb(l)}}}.$$

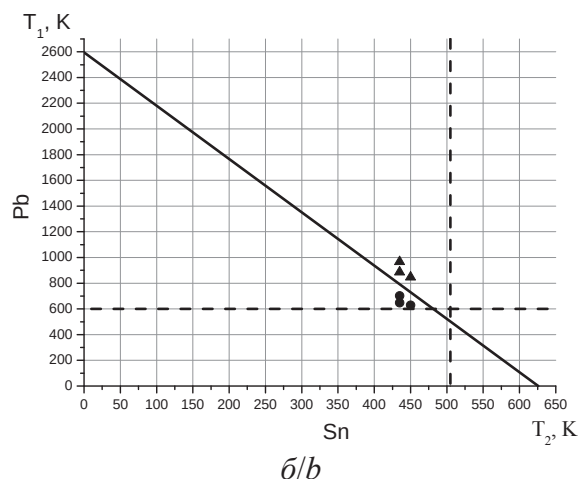
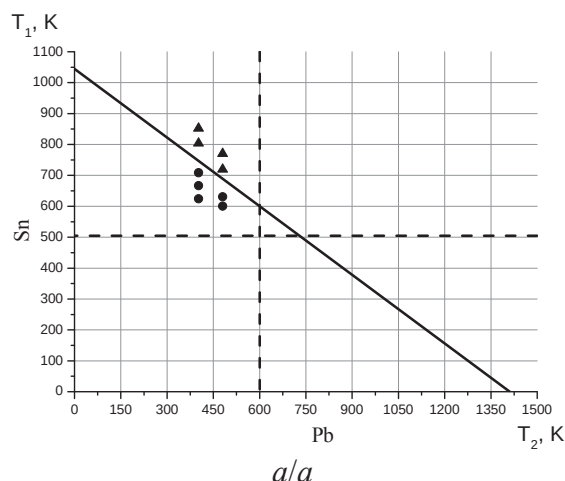


Рис. 9. Графики расчетных зависимостей границы адгезии. Экспериментальные точки, показывающие наличие или отсутствие адгезии, соответствуют температуре капли T_1 и температуре подложки T_2 для пар: а) олово–свинец; б) свинец–олово

Fig. 9. Graphs of the calculated dependences of adhesion boundaries. The experimental points indicating adhesion presence or absence correspond to the temperature of a drop T_1 and temperature of a substrate T_2 for pairs: а) tin–lead; б) lead–tin

На рис. 9 представлены графики расчетной зависимости температуры капли T_1 от температуры подложки T_2 , определяющие границу адгезии для пар олово–свинец (а) и свинец–олово (б). Точки, находящиеся выше расчетной зависимости, должны соответствовать наличию адгезии, точки, находящиеся ниже зависимости, должны соответствовать отсутствию адгезии. Точки, находящиеся на прямой, могут соответствовать как наличию, так и отсутствию или частичной адгезии. Вертикальной пунктирной линии соответствует безразмерная температура плавления подложки, горизонтальной пунктирной линии – безразмерная температура плавления капли.

На рис. 10 представлены графики расчетной зависимости температуры капли T_1 от температуры подложки T_2 , определяющие границу адгезии и экспериментальные точки для пар олово–свинец (а) и свинец–олово (б) в безразмерном виде.

Вертикальной пунктирной линии соответствует безразмерная температура плавления подложки, горизонтальной пунктирной линии – безразмерная температура плавления капли.

Экспериментальная проверка температурного условия адгезии

Для проверки адекватности полученного температурного условия адгезии проведены экспери-

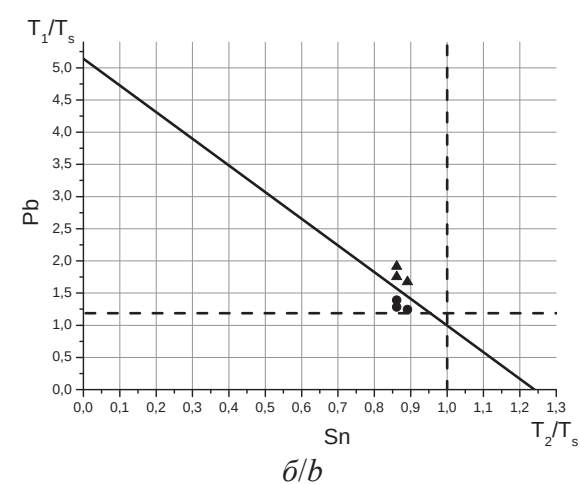
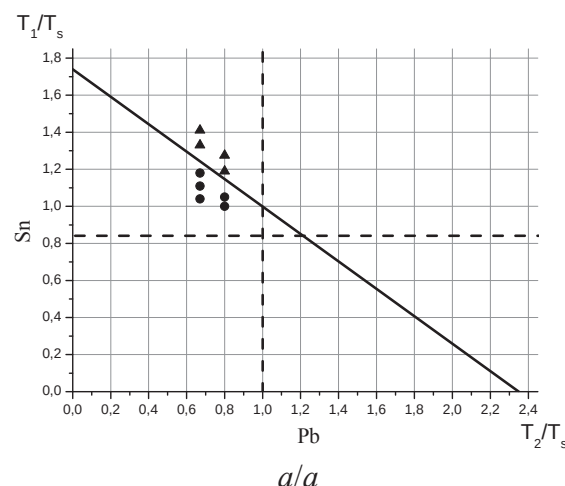


Рис. 10. Графики безразмерных расчетных зависимостей безразмерной температуры капли T_1/T_s и безразмерной температуры подложки T_2/T_s , соответствующие границе адгезии и экспериментальные точки для пар: а) олово–свинец; б) свинец–олово, где T_1 , T_2 – температуры капли и подложки соответственно; T_s – температура плавления подложки

Fig. 10. Graphs of nondimensional calculated dependences of dimensionless drop temperature T_1/T_s and dimensionless substrate temperature T_2/T_s corresponding adhesion boundary and experimental points for pairs: а) tin–lead; б) lead–tin, where T_1 , T_2 are the temperatures of a drop and substrate correspondingly; T_s is the substrate melting temperature

ментальные исследования адгезии капель расплавленного олова на оловянной и свинцовой подложках, а также капель расплава свинца на свинцовой и оловянной подложках. Так как значения температур плавления этих металлов невысоки, это позволяет считать, что при падении жидкой капли с высоты, не превышающей 0,02...0,04 м, ее начальная температура за это время изменяется незначительно. Благодаря сравнительно невысоким температурам для измерений использована одна из наиболее чувствительных термопар – хромель-копелевая термопара. Окисная пленка с каплей олова и свинца перед их падением убиралась путем добавления к расплавленным каплям крупинок канифоли. Для уменьшения окисления поверхности подложки время ее нагрева сокращалось до минимума, и перед падением капли поверхность подложки зачищалась.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 11. Нагрев капли металла – 1 осуществлялся в трубчатом кварцевом нагревателе. Один выход кварцевой трубки – 2 был открыт. Подогрев трубки осуществлялся проволоочным нагревателем из нихрома – 3. Теплоизоляцией нагревателя служила каолиновая вата – 4, закрепленная на трубчатом нагревателе лентой из стеклоткани. Температура капли контролировалась стандартной предварительно откалиброванной хромель-копелевой термопарой – 5.

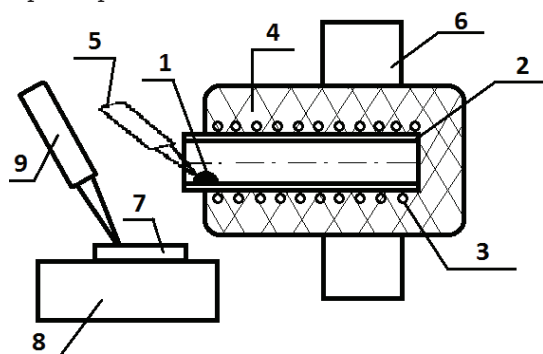


Рис. 11. Схема установка для определения температур капли и подложки, при которых происходит адгезия капли к поверхности

Fig. 11. Diagram of the unit to determine the drop and substrate temperatures required for drop-surface adhesion

Для всех проведенных экспериментов нагретая частица металла представляла собой каплю расплава диаметром $(2...4) \cdot 10^{-3}$ м. При достижении заданной температуры (превышающей температуру плавления металла) кварцевый нагреватель поворотным устройством – 6 переводился в наклонное положение, и капля расплава – 1 падала на поверхность подложки – 7. Нагрев подложки – 7, изготовленной в форме пластины, проводился с помощью плоского электронагревателя – 8, расположенного под пластиной исследуемого материала.

Температура поверхности в точке падения капли расплава измерялась хромель-копелевой термопарой – 9.

Температуры капель и подложки выбирались в соответствии с результатами численных исследований (рис. 5, 6, 9, 10) таким образом, чтобы их значения находились в областях выше и ниже расчетной зависимости, определяющей границу адгезии, а также на этой границе.

Качество адгезии проверяли методом среза капли с подложки. Адгезия оценивалась по виду среза. Если при давлении ножа на боковую стенку капли отрыв происходил по поверхности контакта, то считалось, что адгезия отсутствовала. Наличие адгезии определяли в том случае, когда место среза имело блестящую зеркальную поверхность. Качество адгезии оценивали по отношению площади блестящей поверхности среза к полной площади образовавшегося из капли сплэта. В случае, если это отношение близко к единице, адгезия капли на поверхность подложки считалась полной.

Результаты экспериментальных исследований для пар олово–олово (а) и свинец–свинец (б) приведены на рисунках 5, 6, 9, 10 в виде точек, расположенных выше, ниже и на границе, определяющей адгезию. Для температур капли и подложки, находящихся ниже прямых, адгезия отсутствует. Если температуры капли и подложки расположены на самой расчетной зависимости, это может соответствовать отсутствию, наличию или частичной адгезии. Неопределенность наличия адгезии для точек, лежащих на расчетной зависимости или близких к ней, обусловлена тем, что к исходным температурам капли и подложки добавляется температура дополнительного нагрева от энергии удара капли о поверхность подложки. Вклад добавочной температуры энергии удара зависит от скорости частицы и может быть существенным при около- и сверхзвуковых скоростях. При скоростях частиц менее 100 м/с вклад добавочной температуры энергии удара несущественен и им можно пренебречь [25].

Таким образом, результаты проведенных экспериментальных исследований показали их соответствие полученным численно выражениям температурного условия адгезии (4).

Закключение

Полученные температурные условия адгезии могут быть использованы для предварительной оценки вероятности адгезии расплавленных порошковых материалов. Для этого достаточно определить температуру плавления подложки, теплофизические характеристики материалов, начальные температуры капли и подложки. Введение предложенного температурного условия адгезии в математические модели взаимодействия капли с подложкой вносит условия, необходимые для получения качественного покрытия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Recent development in the research of splat formation process in thermal spraying / Yang Kun, Liu Min Zhou, Deng Chang-guang // Hindawi Publishing Corporation Journal of Materials. – 2013. – V. 2013. – P. 1–14.
- Солоненко О.П. Растекание и затвердевание на подложке капли металла с высокой объемной концентрацией твердых тугоплавких включений // Письма в ЖТФ. – 2012. – Т. 38. – Вып. 1. – С. 37–44.
- Кудинов В.В., Пекшев П.Ю., Белашенко В.Е. Нанесение покрытий плазмой. – М.: Наука, 1990. – 408 с.
- Houben J.M. Future development in plasma spraying // Proceedings of the 2nd National Conference on Thermal Spray / ed. by F.N. Longo. – Long Beach, California, 1984. – P. 1–19.
- Fukumoto M., Hayashi H., Yokoyama T. Relationship between particle's splat pattern and coating adhesive strength of HVOF sprayed Cu-alloy // Journal of Japan Thermal Spraying Society. – 1995. – V. 2. – № 2. – P. 149–156.
- Influence of particle parameters at impact on splat formation and solidification in plasma spraying processes / M. Vardelle, A. Vardelle, A.C. Leger, P. Fauchais, D. Gobin // Journal of Thermal Spray Technology. – 1995. – V. 4. – № 4. – P. 50–58.
- Role of condensates and adsorbates on substrate surface on fragmentation of impinging molten droplets during thermal spray / X. Jiang, Y. Wan, H. Herman, S. Sampath // Thin Solid Films. – 2001. – V. 385. – № 1–2. – P. 132–141.
- Fukumoto M., Nagai H., Yasui T. Influence of surface character change of substrate due to heating on flattening behavior of thermal sprayed particles // Journal of Thermal Spray Technology. – 2006. – V. 15. – № 4. – P. 759–764.
- Huang R., Fukanuma H. Study of influence of particle velocity on adhesive strength of cold spray deposit // Journal of Thermal Spray Technology. – 2012. – V. 21. – Iss. 3–4. – P. 541–549.
- Effect of substrate surface change by heating on transition in flattening behavior of thermal sprayed particles / M. Fukumoto, I. Ohgitani, M. Shiiba, T. Yasui // Proceedings of the International Thermal Spray Conference. – Osaka, Japan, May 2004. – P. 246–251.
- Effect of substrate temperature and roughness on the solidification of copper plasma sprayed droplets / D.K. Christoulis, D.I. Pantelis, N. de Dave-Fabrègue, F. Borit, V. Guipont, M. Jeandin // Materials Science and Engineering A. – 2008. – № 1–2. – V. 485. – P. 119–129.
- Influence of surface laser cleaning combined with substrate preheating on the splat morphology / S. Costil, H. Liao, A. Gammoudi, C. Coddet // Journal of Thermal Spray Technology. – 2005. – № 1. – V. 14. – P. 31–38.
- Heichal Y., Chandra S. Predicting thermal contact resistance between molten metal droplets and a solid surface // Journal of Heat Transfer. – 2005. – V. 127. – № 11. – P. 1269–1275.
- Fukumoto M., Katoh S., Okane I. Splat behavior of plasma sprayed particles on flat substrate surface // Proceedings of the 14th International Thermal Spray Conference. Ed. by A. Ohmori, Japan, High Temperature Society, 1995. – P. 353–358.
- Dhiman R., McDonald A.G., Chandra S. Predicting splat morphology in a thermal spray process // Surface and Coatings Technology. – 2007. – V. 201. – № 18. – P. 7789–7801.
- Three-dimensional transition map of flattening behavior in the thermal spray process / M. Fukumoto, M. Shiiba, H. Kaji, T. Yasui // Pure and Applied Chemistry. – 2005. – V. 77. – № 2. – P. 429–442.
- Chang-wen C., Qiang L. Three-dimensional numerical simulation of splat formation on substrates in plasma spraying // J. Shanghai Jiaotong Univ. (Sci). – 2011. – № 16 (3). – P. 347–351.
- Bussmann M., Mostaghimi J., Chandra S. Modelling the Splash of a Droplet Impacting a Solid Surface // Physics of Fluids. – 2000. – № 12. – P. 3121–3132.
- Mathematical modelling and numerical simulation of splat cooling in plasma spray coatings / H. Fukanuma, R. Huang, Y. Tanaka, Y. Uesugi // JTTEE5. – 2009. – V. 18. – № 5–6. – P. 965–974.
- Modeling fragmentation of plasma-sprayed particles impacting on a solid surface at room temperature / A. McDonald, M. Xue, S. Chandra, J. Mostaghimi, C. Moreau // Comptes Rendus Mécanique. – 2007. – V. 335. – № 5–6. – P. 351–356.
- Numerical simulation of nucleation, solidification, and microstructure formation in thermal spraying / H. Zhang, X.Y. Wang, L.L. Zheng, S. Sampath // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2004. – V. 47. – № 10–11. – P. 2191–2203.
- Немова Т.Н., Колесникова Е.А. Определение температурного поля подложки под каплей расплава методом выравнивания температур соседних слоев // Известия вузов. Физика. – 2010. – Т. 53. – № 12/2. – С. 161–166.
- Колесникова Е.А., Немова Т.Н. Влияние формы частицы на границу плавления в системе капля-подложка // Известия вузов. Физика. – 2011. – № 10/2. – С. 88–92.
- Колесникова Е.А., Немова Т.Н. Расчет температурного поля по методу выравнивания температур и сравнение с результатами эксперимента // Современные техника и технологии: XIX Междунар. научно-практ. конф. – Томск, 2013. – С. 223–224. URL: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2013/C01/V3/108.pdf> (дата обращения: 26.05.2014).
- Углов А.А., Иванов Е.М. Контактные температуры в области малых времен для задач с плавлением и кристаллизацией // Физика и химия обработки материалов. – 1998. – № 4. – С. 50–55.
- Физические величины: справочник / под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

Поступила 27.05.2014 г.

UDC 531.66;532.696

DETERMINATION OF THERMAL FIELDS AND ADHESION TEMPERATURE CONDITIONS IN THE MODEL «LIQUID-ALLOY DROPLET – SUBSTRATE»

Elena A. Kolesnikova,

Tomsk State University of Architecture and Construction, 2, Solyanaya Square,
Tomsk, 634003, Russia. E-mail: alko.gm@gmail.com

The relevance of the discussed issue is caused by the need to advance thermal spray technology and the methods for determining the process best performance.

The main aim of the study is to determine thermal fields and adhesion temperature conditions in the model «liquid-alloy droplet – substrate».

The methods used in the study: the mathematical modeling for thermal fields and adhesion temperature conditions in the model «liquid-alloy droplet – substrate»; experimental validation of the results calculated with the proposed model.

The results. The paper introduces the method for determining thermal fields in the model «liquid-alloy droplet – substrate» based on equalization of temperatures of fixed identical small size neighboring cubic volumes. The method is based on the concept that non-steady process of thermal heating approaches to steady-state process as time and dimensional gaps are reduced. The provided method is free from using differential equations. The calculation of non-steady thermal field is based on thermal transmission equation (algebraic equations). Adhesion temperature conditions for a droplet impacting on a solid surface are obtained. The thermal condition of adhesion is based on substrate melting. Partial adhesion corresponds to melting of the part of substrate surface, total adhesion corresponds to melting of the whole substrate surface. The proposed thermal adhesion condition is valid in case of lack of intermetallic compounds formation between spat and substrate materials. The calculated results are in accordance with the experimental data.

Key words:

Adhesion, droplet, liquid-alloy, substrate, contact temperature, melting temperature, thermal field.

REFERENCES

1. Yang Kun, Liu Min Zhou, Deng Changguang. Recent development in the research of splat formation process in thermal spraying. *Hindawi Publishing Corporation Journal of Materials*, 2013, vol. 2013, pp. 1–14.
2. Solonenko O.P. Rastekanie i zatverdevanie na podlozhke kapli metala s visokoy obemnoy kontsentratsiey tverdykh tugoplavkikh vkhlyucheny [Flattening and solidification of droplet with high volume density of solid heat-resistant particles on substrate surface]. *Technical Physics Letters*, 2012, vol. 38, no. 1, pp. 37–44.
3. Kudinov V.V., Pekshev P.U., Belashenko V.E. *Nanesenie pokryty plazmoy* [Thermal spray coatings]. Moscow, Nauka Publ., 1990. 408 p.
4. Houben J.M. Future development in thermal spraying. *Proc. of the 2nd National Conference on Thermal Spray*. Ed. by F.N. Longo. Long Beach, California, 1984. pp. 1–19.
5. Fukumoto M., Hayashi H., Yokoyama T. Relationship between particle's splat pattern and coating adhesive strength of HVOF sprayed Cu-alloy. *Journal of Japan Thermal Spraying Society*, 1995, no. 2, vol. 2, pp. 149–156.
6. Vardelle M., Vardelle A., Leger A.C., Fauchais P., Gobin D. Influence of particle parameters at impact on splat formation and solidification in plasma spraying processes. *Journal of Thermal Spray Technology*, 1995, no. 4, vol. 4, pp. 50–58.
7. Jiang X., Wan Y., Herman H., Sampath S. Role of condensates and adsorbates on substrate surface on fragmentation of impinging molten droplets during thermal spray. *Thin Solid Films*, 2001, no. 1–2, vol. 385, pp. 132–141.
8. Fukumoto M., Nagai H., Yasui T. Influence of surface character change of substrate due to heating on flattening behavior of thermal sprayed particles. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2006, no. 4, vol. 15, pp. 759–764.
9. Huang R., Fukanuma H. Study of influence of particle velocity on adhesive strength of cold spray deposit. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2012, vol. 21, Iss. 3–4, pp. 541–549.
10. Fukumoto M., Ohgitani I., Shiiba M., Yasui T. Effect of substrate surface change by heating on transition in flattening behavior of thermal sprayed particles. *Proc. of the International Thermal Spray Conference*. Osaka, Japan, May 2004. pp. 246–251.
11. Christoulis D.K., Pantelis D.I., N. de Dave-Fabrègue, Borit F., Guipont V., Jeandin M. Effect of substrate temperature and roughness on the solidification of copper plasma sprayed droplets. *Materials Science and Engineering A*, 2008, vol. 485, no. 1–2, pp. 119–129.
12. Costil S., Liao H., Gammoudi A., Coddet C. Influence of surface laser cleaning combined with substrate preheating on the splat morphology. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2005, vol. 14, no. 1, pp. 31–38.
13. Heichal Y., Chandra S. Predicting thermal contact resistance between molten metal droplets and a solid surface. *Journal of Heat Transfer*, 2005, vol. 127, no. 11, pp. 1269–1275.
14. Fukumoto M., Katoh S., Okane I. Splat behavior of plasma sprayed particles on flat substrate surface. *Proc. of the 14th International Thermal Spray Conference*. Ed. by A. Ohmori. Japan, High Temperature Society, 1995. pp. 353–358.
15. Dhiman R., McDonald A.G., Chandra S. Predicting splat morphology in a thermal spray process. *Surface and Coatings Technology*, 2007, vol. 201, no. 18, pp. 7789–7801.
16. Fukumoto M., Shiiba M., Kaji H., Yasui T. Three-dimensional transition map of flattening behavior in the thermal spray process. *Pure and Applied Chemistry*, 2005, vol. 77, no. 2, pp. 429–442.
17. Chang-wen C., Qiang L. Three-dimensional numerical simulation of splat formation on substrates in plasma spraying. *J. Shanghai Jiaotong Univ. (Sci)*, 2011, no. 16 (3), pp. 347–351.
18. Bussmann M., Mostaghimi J., Chandra S. Modelling the Splash of a Droplet Impacting a Solid Surface. *Physics of Fluids*, 2000, no. 12, pp. 3121–3132.
19. Fukanuma H., Huang R., Tanaka Y., Uesugi Y. Mathematical modelling and numerical simulation of splat cooling in plasma spray coatings. *JTTEE5*, 2009, vol. 18, no. 5–6, pp. 965–974.
20. McDonald A., Xue M., Chandra S., Mostaghimi J., Moreau C. Modeling fragmentation of plasma-sprayed particles impacting on a solid surface at room temperature. *Comptes Rendus Mecanique*, 2007, vol. 335, no. 5–6, pp. 351–356.

21. Zhang H., Wang X.Y., Zheng L.L., Sampath S. Numerical simulation of nucleation, solidification, and microstructure formation in thermal spraying. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, vol. 47, no. 10–11, pp. 2191–2203.
22. Nemova T.N., Kolesnikova E.A. Opređenje temperaturnogo polya podlozhki pod kapley rasplava metodom vyravnivaniya temperatur sosednikh sloev [Temperature field determination based on temperature equalization of fixed identical small size neighboring cubic volumes]. *The bulletin of University, Physic*, 2010, vol. 53, no. 12/2, pp. 161–166.
23. Kolesnikova E.A., Nemova T.N. Vliyanie formy chastitsy na granitsu plavleniya v sisteme kaplya-podlozhka [Influence of splat formation on melting boundary in the model droplet–substrate]. *Izvestiya vuzov. Fizika*, 2011, no. 10/2, pp. 88–92.
24. Kolesnikova E.A., Nemova T.N. Raschet temperaturnogo polya po metodu vyravnivaniya temperatur i sravnenie s rezultatmi eksperimenta [Thermal field calculation based on temperature equalization of fixed identical small size neighboring cubic volumes and comparing with experimental data]. *Sovremennye tekhnika i tekhnologii. XIX Mezhdunarodnaya nauchno-practicheskaya konferentsia* [Proc. 20th Int. conf. Advanced engineering and technology]. Tomsk, 2013. pp. 223–224. Available at: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2013/C01/V3/108.pdf> (accessed 26 May 2014).
25. Uglov A.A., Ivaniv E.M. Kontaknyye temperatury v oblasti malyykh vremen dlya zadach s plavleniem i kristalizatsiyey [Contact temperatures in low-interval area during melting and solidification]. *Phisika i khimiya obrabotki materialov*, 1998, no. 4, pp. 50–55.
26. *Phizicheskie velichiny* [Physical quantities]. Ed. by I.S. Grigoryev, E.Z. Meylikhov. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 1232 p.

Received: 27 May 2014.