

Математические методы исследования

Mathematical methods of investigation

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-9-82-90>

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНО-ВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЙ ПРОЦЕССА ФРИКЦИОННОЙ НАПЛАВКИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРГАНИЗОВАННЫХ СТАЛЕАЛЮМИНИЕВЫХ КОМПОЗИЦИЙ

© Владислав Дмитриевич Захарченко¹, Роман Сергеевич Михеев^{1*},
Игорь Евгеньевич Калашников^{1,2}

¹ Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1; *e-mail: mikheev.roman@mail.ru

² Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН, Россия, 119334, Москва, Ленинский пр-т, д. 49; e-mail: kalash2605@mail.ru

*Статья поступила 16 февраля 2023 г. Поступила после доработки 30 марта 2023 г.
Принята к публикации 28 апреля 2023 г.*

Разработана математическая модель для исследования температурно-временных условий процесса фрикционной наплавки при изготовлении функционально-организованных сталеалюминиевых композиций и проведена ее валидация. В качестве материала расходного стержня при фрикционной наплавке применяли прутки из чистого алюминия марки ER1100. Подложка в форме прямоугольной пластины была изготовлена из качественной стали 20. Геометрическую модель объекта при моделировании процесса фрикционной наплавки в программном комплексе ANSYS 2021R2 задавали в виде стержня и подложки. Исходными данными для проведения расчетов температурно-временных условий процесса фрикционной наплавки в ПК ANSYS являлись: геометрические параметры объекта моделирования; характеристики тепловых нагрузок источника нагрева, зависящие от технологических параметров режима наплавки (скорость осевого вращения стержня, осевое давление, граничные условия объекта моделирования для температурной задачи); вспомогательные параметры, определяющие порядок выполнения расчетов. В качестве параметра тепловых нагрузок источника рассматривали тепловую мощность, возникающую в месте физического контакта вращающегося расходного стержня и подложки. Расчет распространения тепла для процесса фрикционной наплавки проводили по схеме с нормально-крутовым источником, расположенным на поверхности подложки. Выбранная расчетная схема отражает основную особенность процесса фрикционной наплавки — введение тепла вследствие трения между вращающимся расходным стержнем и подложкой. Показано, что за счет учета граничных условий и геометрических особенностей 3D-модели разработанная математическая модель характеризуется удовлетворительной сходимостью и позволяет с неопределенностью не более 5 % определять температуру нагрева стальной подложки при формировании методом наплавки на ее поверхности функциональных алюминиевых покрытий, а также композиционных материалов на их основе.

Ключевые слова: сталеалюминиевые композиции; фрикционная наплавка; математическая модель; температурно-временные условия; тепловая мощность.

MATHEMATICAL METHODS IN STUDYING TEMPERATURE-TIME CONDITIONS OF THE FRICTION SURFACING IN THE MANUFACTURE OF FUNCTIONALLY ORGANIZED STEEL-ALUMINUM COMPOSITIONS

© Vladislav D. Zaharchenko¹, Roman S. Mikheev^{1*}, Igor E. Kalashnikov^{1,2}

¹ Moscow State Technical University, 5, 2-ya Baumanskaya, Moscow, 105005, Russia; *e-mail: mikheev.roman@mail.ru

² Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences, 49, Leninskii prospekt, Moscow, 119334, Russia; e-mail: kalash2605@mail.ru

Received February 16, 2023. Revised March 30, 2023. Accepted April 28, 2023.

A mathematical model for studying temperature and time conditions of the process of friction surfacing in the manufacture of functionally organized steel-aluminum compositions has been developed and validated. Bars made of pure aluminum grade ER1100 were used as the consumable rod material during friction surfacing. The substrate in the form of a rectangular plate was made of high-quality steel 20. The geometric model of the object when modeling the process of friction surfacing in the ANSYS 2021R2 software package was specified in the form of a rod and a substrate. The initial data for calculating temperature-time conditions of the friction surfacing process are: geometric parameters of the simulation object; characteristics of thermal loads of the heating source which depend on the technological parameters of the surfacing mode (the speed of axial rotation of the rod, axial pressure, boundary conditions of the simulation object for the temperature problem), and auxiliary parameters that determine the order of calculations. The thermal power arising at the point of physical contact between the rotating consumable rod and the substrate was considered a parameter of the source thermal load. The calculation of heat propagation for the friction surfacing process was carried out according to a scheme with a normally circular source located on the substrate surface. The calculation scheme directly reflects the main feature of the friction surfacing process: the introduction of heat due to friction between the rotating consumable rod and the substrate. It is shown that taking into account the boundary conditions and geometric features of the 3D model provide a satisfactory convergence of developed mathematical model and ensure the uncertainty of no more than 5 % in determining the heating temperature of the substrate when forming functional aluminum coatings, as well as composite materials on their base when surfacing them on the surface of steel substrates.

Keywords: steel-aluminum compositions; friction surfacing process; mathematical model; temperature-time conditions; thermal power.

Введение

Среди многочисленных процессов создания функционально-организованных композиций за счет нанесения функциональных покрытий особый интерес представляет фрикционная наплавка (рис. 1). Данный технологический процесс разработан относительно недавно и несмотря на продолжающиеся до настоящего времени экспериментальные исследования, проводимые преимущественно в лабораторных условиях, зарекомендовал себя как весьма перспективный способ формирования покрытий. Особое значение процесс фрикционной наплавки имеет для изготовления сталеалюминевых композиций [1 – 3]. При этом на подложку из стали наносят функциональные покрытия из алюминиевых сплавов, а также дисперсно-наполненных композиционных материалов на их основе [4 – 6]. Благодаря сочетанию высоких значений удельной прочности и коррозионной стойкости, а также сниженной массе изделия и повышенным триботехническим характеристикам такие композиции находят широкое применение в разных отраслях промышленности [7 – 9].

Эффективность нанесения покрытий на рабочую поверхность изделий, а также качество подобных покрытий зависят от выбора значений технологических параметров процесса фрикционной наплавки. С важнейшими из них, такими как частота вращения расходуемого стержня, осевое усилие на него и скорость наплавки, связаны температурно-временные условия процесса [10, 11]. Температурно-временное состояние элементов, взаимодействующих друг с другом при фрикционной наплавке, в значительной мере

обуславливает характер, направление и кинетику физико-химических и металлургических процессов, а также величину и характер возникающих в изделиях деформаций и напряжений [11 – 14]. Таким образом, без учета температурно-временных условий в области образования соединения нельзя выбрать значения технологических параметров процесса фрикционной наплавки, а также достоверно объяснить большинство явлений, наблюдаемых при подобном спосо-

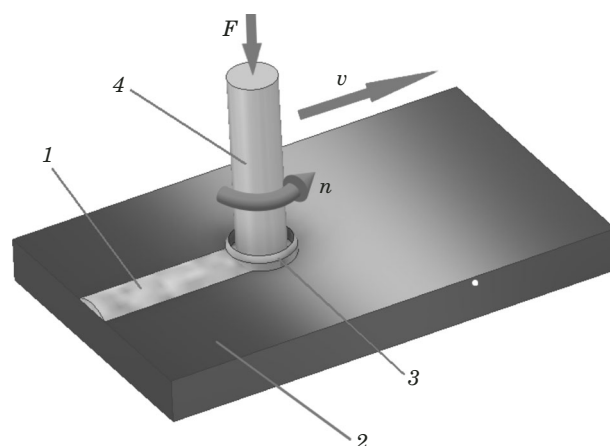


Рис. 1. Схема процесса фрикционной наплавки алюминия на сталь: 1 — наплавленный слой; 2 — подложка; 3 — вязкопластичный граничный слой; 4 — расходуемый стержень из наплавляемого материала; v — скорость наплавки; F — осевое усилие; n — частота вращения расходуемого стержня

Fig. 1. Diagram of the frictional surfacing process of aluminum on steel: 1 — deposited layer; 2 — substrate; 3 — viscoplastic boundary layer; 4 — consumable rod of deposited material; v — surfacing rate; F — axial force; n — rotation frequency of the consumable rod

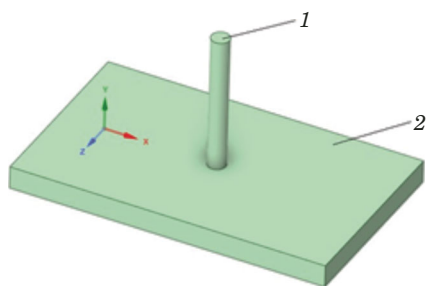


Рис. 2. Геометрическая модель объекта при моделировании процесса фрикционной наплавки: 1 — расходный стержень; 2 — подложка

Fig. 2. Geometric model of the object in modeling of the friction surfacing: 1 — consumable rod; 2 — substrate

бе формирования функциональных покрытий. Определение таких параметров экспериментальным путем обычно занимает длительное время и требует существенных финансовых затрат. Поэтому для решения этой важной задачи в работе предложено применение математических методов исследования температурно-временных условий процесса фрикционной наплавки. Работа не с самим объектом (явлением, процессом), а с его моделью дает возможность определять его свойства и характер поведения в разных условиях. В то же время численные эксперименты с моделями объектов позволяют, опираясь на современные вычислительные методы и технические инструменты, подробно изучать объекты (явления, процессы), недоступные сугубо теоретическим подходам [15, 16]. Цель исследования — разработка математической модели процесса фрикционной наплавки, позволяющей определять температуру нагрева в области соединения при изготовлении сталеалюминевых соединений, а также ее валидация экспериментальными методами.

Данные для математического моделирования процесса фрикционной наплавки

В качестве материала расходного стержня при фрикционной наплавке применяли прутки из чистого алюминия марки ER1100 (0,05 % Mn, 0,2 % Fe, 0,05 % Cu, 0,1 % Si, 0,1 % Zn, Al — остальное по ГОСТ 4784), длиной 30 и диаметром 4 мм. Подложку в форме пластины размером 70 × 42 × 5 мм изготавливали из качественной стали 20 (0,2 % C, 0,25 % Cu, 0,35 % Mn, 0,17 % Si, 0,25 % Ni, 0,04 % S, 0,04 % P, 0,25 % Cr, 0,08 % As, Fe — остальное по ГОСТ 1050). Моделирование температурно-временных условий проводили в программном комплексе ANSYS 2021R2 (далее — ПК ANSYS) методом конечных элементов. Выбор данного метода обусловлен его доступностью и широким практическим применением в качестве эффективного средства решения задач при сварке и наплавке [17 – 19].

Исходные данные для проведения расчетов температурно-временных условий процесса фрикционной наплавки в ПК ANSYS следующие:

геометрические параметры объекта моделирования;

характеристики тепловых нагрузок источника нагрева, зависящие от технологических параметров режима наплавки: скорость осевого вращения стержня (2000 об/мин), осевое давление (10, 20 и 30 МПа);

граничные условия объекта моделирования для температурной задачи, а также вспомогательные параметры, определяющие порядок выполнения расчетов.

Геометрическую модель объекта при моделировании процесса фрикционной наплавки задавали в виде двух тел, а именно — расходного стержня и подложки (рис. 2). Их объединяли друг с другом в объект моделирования с помощью способа «сборка» в ПК ANSYS, предварительно создав геометрические трехмерные модели. Отметим, что при моделировании зависимость температуры от теплофизических свойств исследуемых образцов не учитывали.

Параметры тепловых нагрузок источника нагрева следующие: частота вращения и осевое давление на расходный стержень; тепловая мощность, возникающая при трении расходного стержня и подложки.

Температуры в контрольных точках образцов для валидации математической модели регистрировали контактным методом с применением термопар хромель-алюмель (тип К) диаметром 0,3 мм. Термопары на образцах устанавливали и закрепляли конденсаторной сваркой с энергией разряда 50 Дж. Это обеспечивало физический контакт термопары с поверхностью образца и, соответственно, необходимые условия теплопередачи. Выходным сигналом термопар являлась термоЭДС, для измерения которой применяли устройства аналогового ввода-вывода, передающие данные на персональный компьютер через преобразователь интерфейсов. Данные сохраняли в виде массива чисел и обрабатывали программным комплексом Microsoft Excel. В качестве устройств аналогового ввода-вывода применяли 32-канальный регистратор параметров сварки производства ЗАО «Лаборатория электроники» с периодом опроса одного канала 0,1 с, что было достаточным для достоверного определения максимальных температур нагрева образцов в контрольных точках в условиях фрикционной наплавки.

Для тарировки на регистратор подавали фиксированное напряжение, значение которого измеряли потенциометром. Дальнейшее сравнение температур, определенных регистратором и указанных в градуированных таблицах ГОСТ Р

8.585, показало, что отклонение показаний прибора не превышало $\pm 2^\circ\text{C}$ для измеряемых температур в пределах до 473 К.

Математическая модель процесса фрикционной наплавки

Объект моделирования представлял собой массивное тело, состоящее из изотропных материалов, на поверхности которого действует движущийся источник нагрева (q_2) и происходит теплообмен (q_h) с окружающей средой (рис. 3).

Распространение тепла происходит согласно уравнению теплопроводности [20]

$$\begin{aligned} c\rho \frac{dT}{dt} = \frac{d}{dx} \left(\lambda_x \frac{dT}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left(\lambda_y \frac{dT}{dy} \right) + \\ + \frac{d}{dz} \left(\lambda_z \frac{dT}{dz} \right) + q_3(x, y, z, t), \end{aligned} \quad (1)$$

где $\lambda_x(x, y, z, T)$, $\lambda_y(x, y, z, T)$, $\lambda_z(x, y, z, T)$ — функции, описывающие распределение теплопроводности материала по направлениям осей декартовой системы координат; $c\rho = c\rho(x, y, z, T)$ — функция, описывающая распределение объемной теплоемкости материала; $q_3(x, y, z, t)$ — функция, описывающая распределение удельной мощности объемных источников (стоков) теплоты.

Решение полученного дифференциального уравнения теплопроводности возможно только в случае задания начальных и граничных условий, описывающих соответственно распределение температур в начальный момент времени и взаимодействие массивного тела с окружающей средой на его границах (см. рис. 3).

В соответствии с граничным условием второго рода кривая температуры на границе между источником нагрева и массивным телом может иметь любую ординату при обязательно заданном градиенте.

Взаимодействие между массивным телом и окружающей средой характеризуется граничным условием третьего рода:

$$q_h = H(T - T_{cp}), \quad (2)$$

где q_h , Вт/см² — тепловой поток, вызванный теплоотдачей с поверхности; H , Вт/(см² · К) — коэффициент теплоотвода с поверхности; T , К — температура поверхности тела; T_{cp} , К — температура окружающей среды, значение которой составляло 293 К.

Расчет распространения тепла в процессе фрикционной наплавки целесообразно проводить по схеме с нормально-круговым источником теплоты, расположенным на поверхности плоского слоя. Выбранная расчетная схема отражает все основные особенности процесса фрикцион-

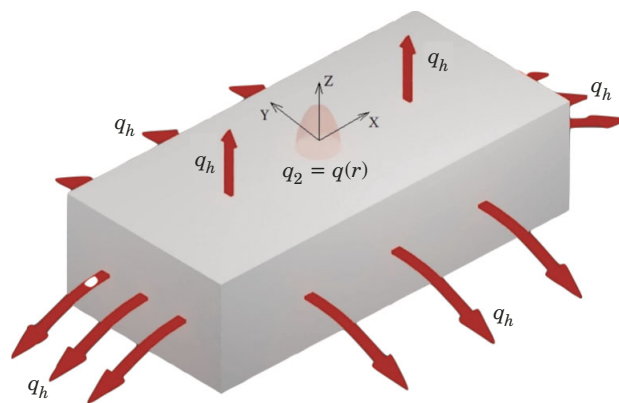


Рис. 3. Схема взаимодействия объекта моделирования с окружающей средой

Fig. 3. The scheme of interaction between the modeling object and the environment

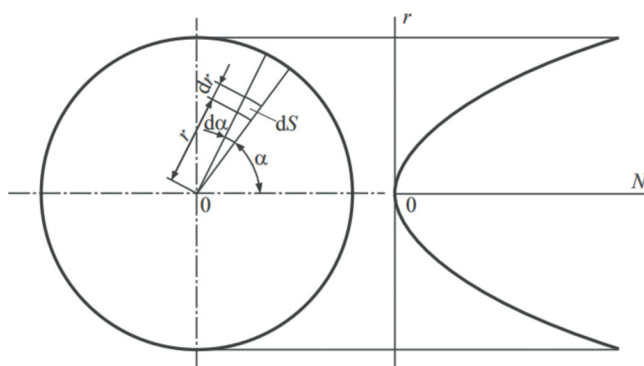


Рис. 4. Распределение мощности тепловыделения (N) по радиусу пятна нагрева (r) с учетом постоянства значений осевого давления (P) и коэффициента трения (f)

Fig. 4. Heat power distribution (N) along the radius of the heating spot (r) at the constant values of the pressure (P) and friction coefficient (f)

ной наплавки, включающие возникновение тепла на границе расходоемого стержня и подложки вследствие трения между ними, влияние осевого давления, приложенного к расходоемому стержню, на количество теплоты, вырабатываемое в процессе трения [16].

Применительно к представленной на рис. 1 схеме процесса фрикционной наплавки аналитическое выражение распределения удельной мощности источника теплоты может быть получено путем рассмотрения процесса тепловыделения на элементарной площадке dS (рис. 4). На подобной бесконечно малой площадке действует элементарная сила трения

$$dF = PfdS = Pfrdrd\alpha, \quad (3)$$

где P — осевое давление; f — коэффициент трения; r — расстояние от оси вращения инструмента до рассматриваемой точки.

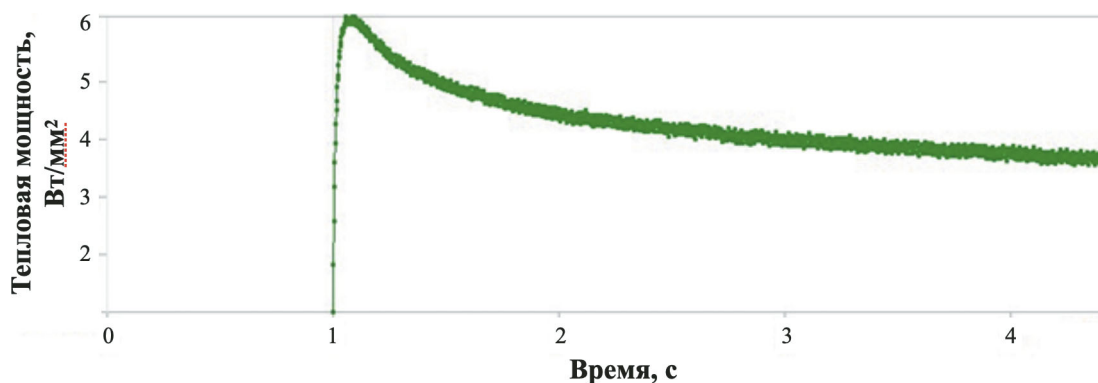


Рис. 5. Характерный вид изменения тепловой мощности в области под вращающимся стержнем при осевом давлении 20 МПа

Fig. 5. A characteristic type of change in the thermal power in the area under the rotating rod at an axial pressure of 20 MPa

Значение момента этой силы (dM) относительно оси вращения, проходящей через нулевую точку, может быть определено по формуле

$$dM = r dF = P f r^2 dr d\alpha. \quad (4)$$

Тепловая мощность в рассматриваемом элементарном элементе составит

$$dN = dM \omega = \omega P f r^2 dr d\alpha, \quad (5)$$

где ω — скорость вращения расходуемого стержня.

При постоянстве значений осевого давления (P) и коэффициента трения (f) распределение мощности тепловыделения по радиусу пятна нагрева имеет вид квадратичной параболы (см. рис. 4). При таких допущениях путем интегрирования выражения (5) определим полную мощность источника теплоты:

$$\begin{aligned} N &= \int_0^{2\pi} \int_0^R \omega P f r^2 dr d\alpha = \int_0^{2\pi} \omega P f \frac{r^3}{3} r_0^R d\alpha = \\ &= \int_0^{2\pi} \omega P f \frac{R^3}{3} d\alpha = 2\pi \omega P f \frac{R^3}{3}, \end{aligned} \quad (6)$$

где R — радиус расходуемого стержня. Исходя из выражения (6), получаем следующую зависимость:

$$\omega P f = \frac{3N}{2\pi R^3}. \quad (7)$$

Теперь из выражения (5) с применением зависимости (7) найдем удельную мощность тепловыделения в каждой точке расходуемого стержня при фрикционной наплавке:

$$\frac{dN}{dS} = \omega P f r = \frac{3N}{2\pi R^3} r. \quad (8)$$

Полная мощность источника теплоты (N) относится к входным параметрам разрабатываемой математической модели. Расчет значений удельной мощности тепловыделения по математическим выражениям (3) – (8) необходим для определения закономерности ее распределения по площади физического контакта.

Разработанная математическая модель учитывает физический контакт по всей поверхности расходуемого стержня, поскольку в процессе наплавки пластифицированный металл выдавливается из зоны контакта, тем самым обеспечивая физическое взаимодействие. С повышением температуры нагрева пластичность материала расходуемого стержня закономерно увеличивается и при постоянном значении осевого давления между ним и подложкой обеспечивается надежный физический контакт. Поэтому для характеристики области под расходуемым стержнем введена зависимость от температуры нагрева переменная — теплопередача контакта. Таким образом, решается нестационарная задача, разделенная по времени на три этапа: вращение расходуемого стержня и приработка; непосредственно наплавка; отделение части расходуемого стержня от подложки и охлаждение наплавленного слоя. Теплоотвод в подложку учитывается при расчете полной мощности источника теплоты. Для учета ограниченности размеров расходуемого стержня при математическом описании свободных от физического контакта его поверхностей, а также поверхности подложки были применены граничные условия третьего рода, характеризующие теплоотдачу в окружающую среду. Начальные условия устанавливали температуру расходуемого стержня и подложки, равную 293 К.

Значения тепловой мощности (q_2) в области под расходуемым стержнем при разном осевом давлении определяли в модуле Coupled Field Transient ПК ANSYS (рис. 5). Максимальные

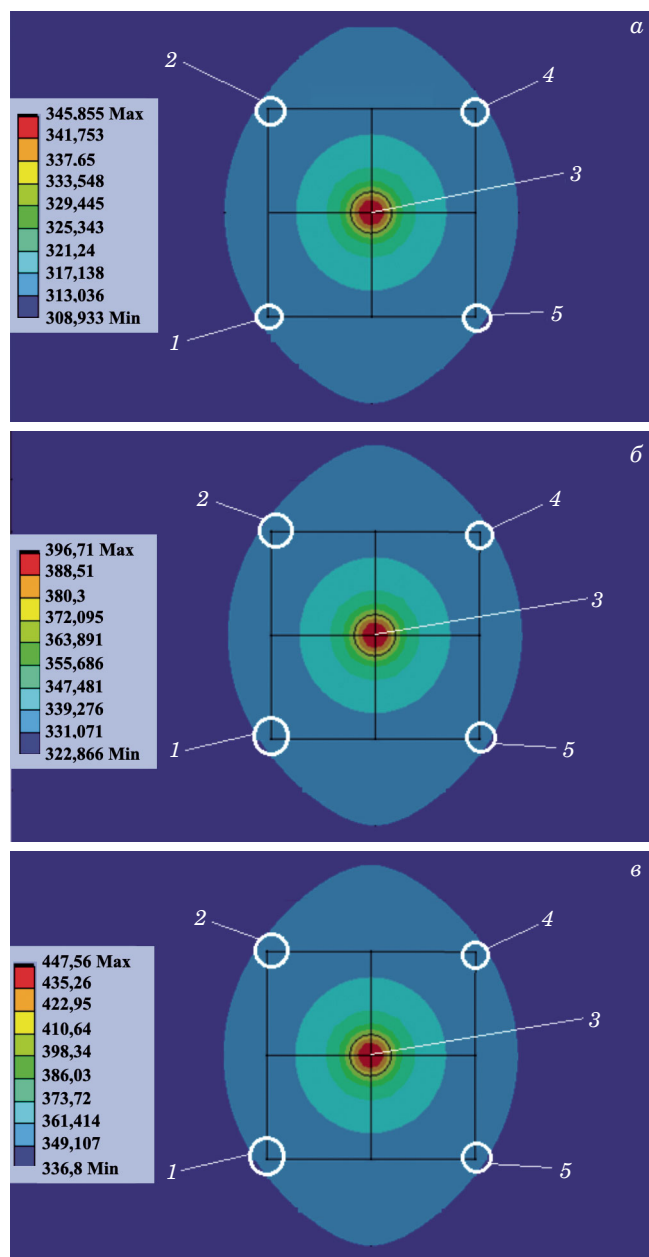


Рис. 6. Температурное поле, характерное для процесса фрикционной наплавки, при осевом давлении на расходимый стержень, равном 10 (а), 20 (б) и 30 МПа (в): цифры — области определения температур нагрева на поверхности подложки (1, 2, 4 и 5) и под расходимым стержнем (3)

Fig. 6. Temperature field of the friction surfacing process with an axial pressure on the consumable rod of: а) 10 MPa; б) 20 MPa; в) 30 MPa. The numbers indicate the areas for determining the heating temperatures on the substrate surface (1, 2, 4, and 5) and under the consumable rod (3)

значения тепловой мощности составили 3, 6 и 9 Вт/мм² при осевом давлении на расходимый стержень 10, 20 и 30 МПа соответственно.

В целях построения численным методом стационарного температурного поля, характерного для процесса фрикционной наплавки, с учетом определенных максимальных значений тепловой

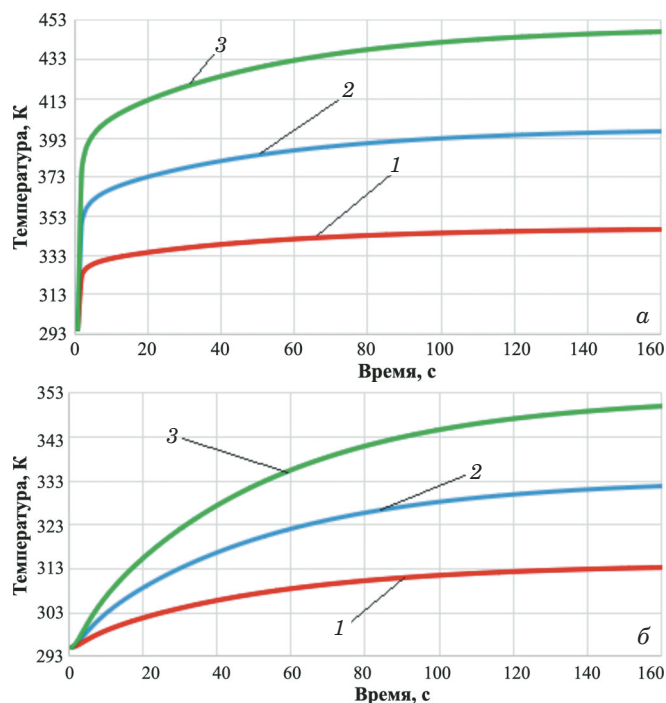


Рис. 7. Изменение температуры нагрева под расходимым стержнем (а) и поверхности подложки (б) в зависимости от длительности процесса фрикционной наплавки при осевом давлении на расходимый стержень, равном 10 (1), 20 (2) и 30 МПа (3)

Fig. 7. Changes in the heating temperature under the consumable rod (а) and the substrate surface (б) depending on the duration of the friction surfacing process at the axial pressure on the consumable rod: 1) 10 MPa; 2) 20 MPa; 3) 30 MPa

мощности применяли модуль Transient Thermal ПК ANSYS (рис. 6). Это позволило численно установить зависимость между температурой нагрева разных областей подложки и длительностью процесса фрикционной наплавки при разных величинах осевого давления (рис. 7). Закономерный результат — наибольшее значение максимальной температуры нагрева подложки (447 К) в случае ведения процесса фрикционной наплавки при максимальном осевом давлении на расходимый стержень.

Валидация разработанной математической модели

Для валидации разработанной математической модели процесса фрикционной наплавки проводили экспериментальное определение контактным методом значений температур нагрева в соответствующих зонах подложки. Процесс фрикционной наплавки осуществляли в соответствии с технологическими параметрами режима фрикционной наплавки. Отсутствие перемещения расходимого стержня в эксперименте позво-

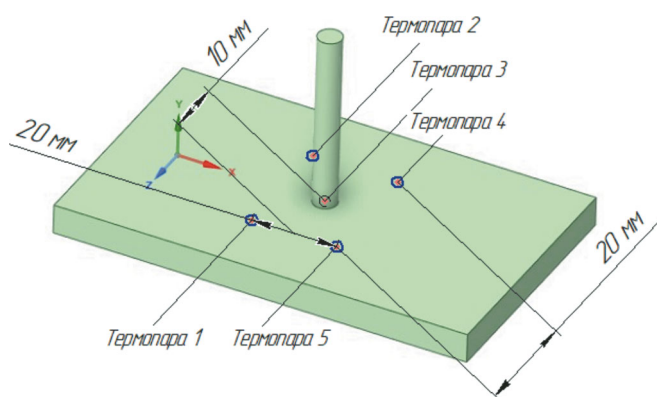


Рис. 8. Схема расположения термопар для измерения температур нагрева подложки в процессе фрикционной наплавки

Fig. 8. Diagram of the thermocouple arrangement for measuring substrate heating temperatures during friction surfacing

ляло сформировать стационарное температурное поле и считать это граничным условием. Схема расположения термопар в контрольных точках подложки представлена на рис. 8. Расстояния от мест установки термопар до вращающегося расходоуемого стержня, а также между термопарами составляли 10 и 20 мм соответственно. В результате физический контакт и механическое воздействие между вращающимся расходоуемым стержнем и термопарами в процессе фрикционной наплавки были исключены. Для определения температуры нагрева под расходоуемым стержнем с противоположной стороны подложки было просверлено отверстие диаметром 4 и глубиной 4 мм, в котором располагали термопару 3.

Результаты экспериментальной оценки значений температур нагрева подложки в процессе фрикционной наплавки представлены в табл. 1. Видно, что наибольшая температура нагрева подложки в области под расходоуемым стержнем (412 К) зафиксирована при максимальном зна-

Таблица 1. Результаты экспериментальной оценки температуры нагрева подложки в процессе фрикционной наплавки

Table 1. Results of experimental evaluation of the substrate heating temperature during friction surfacing

Осевое давление на расходоуемый стержень, МПа	Максимальная температура нагрева, К		Длительность процесса фрикционной наплавки*, с
	под расходоуемым стержнем	на поверхности подложки	
10	349	316	80
20	406	332	160
30	412	320	31

* До нарушения устойчивости расходоуемого вращающегося стержня.

чении осевого давления, равном 30 МПа. В этих условиях температура на поверхности подложки меньше таковой при осевом давлении 20 МПа (320 К против 332 К). Это, вероятно, связано с малой длительностью (31 с) процесса фрикционной наплавки при наибольшем осевом давлении без нарушения устойчивости расходоуемого вращающегося стержня. Разница между максимальными значениями температур нагрева в областях под расходоуемым стержнем и на поверхности стальной подложки составляет от 33 К (при осевом давлении $p = 10$ МПа) до 92 К (при осевом давлении $p = 30$ МПа).

Валидация разработанной математической модели заключалась в сопоставлении значений температур нагрева подложки, полученных расчетными методами при моделировании, с экспериментально определенными в контрольных точках. Неопределенность или расхождение результатов моделирования и эксперимента определяли в процентах по формуле

$$P = \frac{T_m - T_z}{T_m} \cdot 100\%, \quad (9)$$

где T_m и T_z — значения температур (К) нагрева подложки, определенные при моделировании и экспериментально.

Изменение значений температур нагрева подложки на поверхности и под расходоуемым стержнем, полученных экспериментально и численно с помощью разработанной математической модели, в зависимости от длительности процесса фрикционной наплавки представлены на рис. 9 и 10. Видно, что наибольшее расхождение в значениях температур нагрева наблюдается на начальном этапе приработки процесса фрикционной наплавки длительностью не более 20 с. На данном этапе экспериментально измеренные значения температур нагрева ниже на 10 – 15 %, чем полученные численно, при всех опробованных значениях осевого давления на расходоуемый стержень. Это может быть связано с нарушением стабильности на начальном этапе приработки процесса фрикционной наплавки вследствие изменения геометрии поверхностей трения и физико-химических свойств поверхностных слоев контактирующих материалов.

На следующих этапах процесса фрикционной наплавки расхождения в значениях температур нагрева подложки уменьшаются. Так, наибольшие значения расхождения температур нагрева поверхности подложки и области под расходоуемым стержнем (табл. 2) не превышают 2,3 и 3,4 % соответственно, что свидетельствует об удовлетворительной сходимости разработанной математической модели [8].

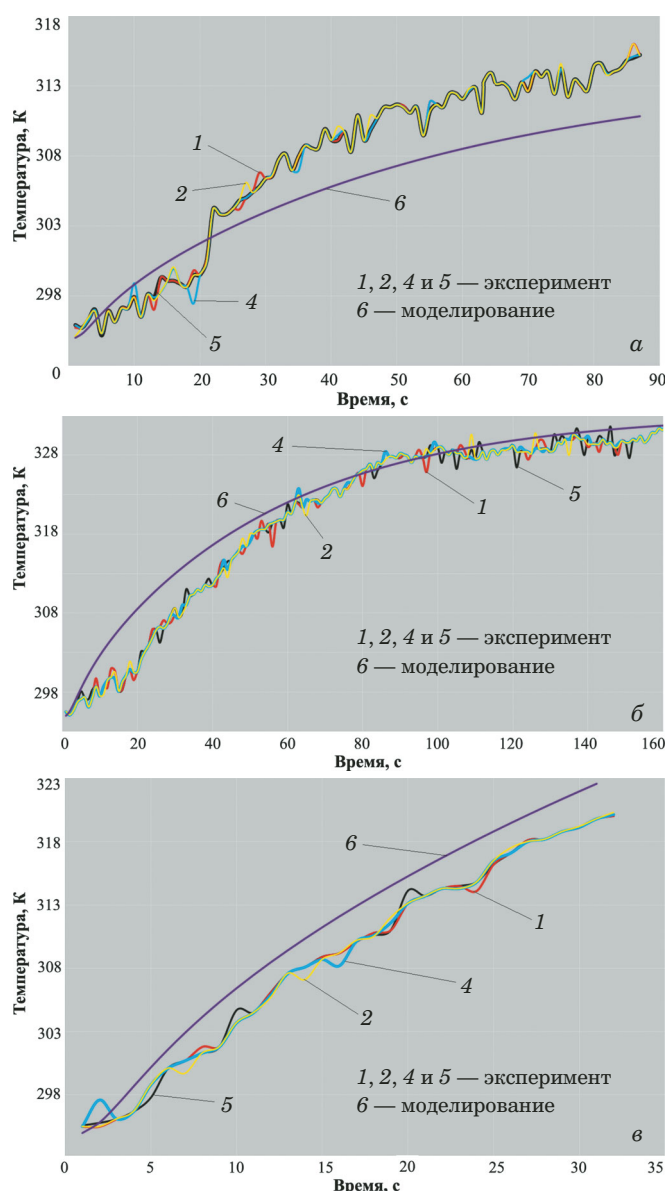


Рис. 9. Зависимости температуры нагрева поверхности подложки от длительности процесса фрикционной наплавки при осевом давлении 10 (а); 20 (б) и 30 МПа (в). Цифры 1, 2, 4 и 5 обозначают номера термопар согласно рис. 8

Fig. 9. Dependence of the substrate surface heating temperature on the duration of friction surfacing at an axial pressure of 10 (a), 20 (b), and 30 MPa (c). The numbers 1, 2, 4, and 5 indicate the thermocouple numbers according to Fig. 8

Таким образом, разработанная математическая модель процесса фрикционной наплавки по результатам валидации характеризуется удовлетворительной сходимостью (расхождение результатов моделирования и эксперимента не более 5 %). Поэтому ее применение может способствовать выбору значений основных технологических параметров процесса фрикционной наплавки. Это позволяет рекомендовать данную модель для решения практических вопросов, воз-

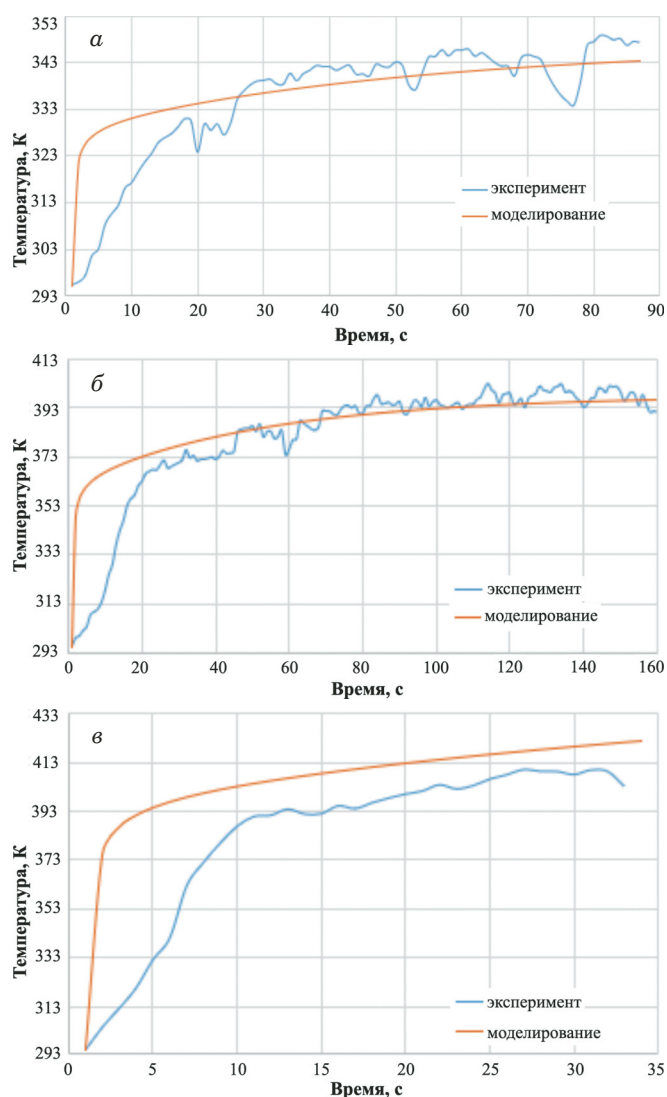


Рис. 10. Зависимости температуры нагрева подложки под расходуемым стержнем от длительности процесса фрикционной наплавки при осевом давлении 10 (а), 20 (б) и 30 МПа (в)

Fig. 10. Dependence of the substrate heating temperature under the consumable rod on the duration of friction surfacing process at an axial pressure of 10 (a), 20 (b), and 30 MPa (c)

никающих при разработке технологических процессов фрикционной наплавки.

Выводы

Разработана математическая модель для исследования температурно-временных условий процесса фрикционной наплавки при изготовлении функционально-организованных сталеалюминиевых композиций и проведена ее валидация. Показано, что данная модель характеризуется удовлетворительной сходимостью, а ее применение позволяет с неопределенностью не более 5 % определять температуру нагрева не только поверхности подложки, но и области, распо-

Таблица 2. Наибольшие значения расхождения экспериментальных и численно определенных температур нагрева поверхности подложки и области под расходующим стержнем в зависимости от удельного давления

Table 2. The greatest values of the discrepancy between the experimental and numerically determined heating temperatures of the substrate surface and the area under the consumable rod as a function of the axial pressure

Осевое давление на расходующий стержень, МПа	Наибольшее расхождение температуры нагрева, %		Температура нагрева, К*	
	под расходующим стержнем	на поверхности подложки	под расходующим стержнем	на поверхности подложки
10	2,9	1,6	333/343	314/309
20	3,4	2,3	373/386	303/310
30	3,4	1,3	401/415	314/318

* Числитель и знаменатель — значения температуры, полученные экспериментально и численно с применением разработанной математической модели.

женной под расходующим вращающимся стержнем при формировании методом наплавки на поверхности стальной подложки функциональных алюминиевых покрытий, а также композиционных материалов на их основе.

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00366, <https://rscf.ru/project/22-29-00366>.

ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

- Gandra J., Krohn H., Miranda R. M., et al. Friction surfacing — A review / Journal of Materials Processing Technology. 2014. Vol. 214. P. 1062 – 1093. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2013.12.008
- Badheka K., Badheka V. Friction surfacing of aluminium on steel: An experimental approach / Materials Today: Processing. 2017. Vol. 4. P. 9937 – 9941. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.06.297
- Sekhar S. R., Raju M., Govardhan D., et al. Optimization of friction surfaced deposits of aluminium alloy 6068 over low carbon steel / Materials Today: Proceedings. 2022. Vol. 62. P. 4480 – 4486. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.04.939
- Mikheev R. S., Kalashnikov I. E., Bolotova L. K., Kolmakov A. G. Research of the intermetallics formation mechanism during the synthesis of functionally graded layered steel-aluminum compositions / IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 848. N 012056. P. 1 – 7. DOI: 10.1088/1757-899X/848/1/012056
- Carvalho G. H., Galvao I., Mendes R., Leal R. M. Microstructure and mechanical behaviour of aluminium-carbon steel and aluminium-stainless steel clads produced with an aluminium interlayer / Materials Characterization. 2019. Vol. 155. P. 109819. DOI: 10.1016/j.matchar.2019.109819
- Kaur J., Mangla V., Singh J., et al. Cladding of stainless steel (SS304) on aluminium alloy (AA1100) by explosive welding / Materials Today: Processing. 2018. Vol. 5. Issue 9. P. 19136 – 19139. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.06.267
- Ha D. W., Jeon G. W., Shin J. S., Jeong C. Y. Mechanical properties of steel-aluminum multi-materials using a structural adhesive / Materials Today: Communications. 2020. Vol. 25. P. 101552. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2020.101552
- Liu J., Wu B., Wang Z., et al. Microstructure and mechanical properties of aluminum-steel dissimilar metal welded using arc and friction stir hybrid welding / Materials and Design. 2022. Vol. 225. P. 11520. DOI: 10.1016/j.matdes.2022.111520
- Mikheev R. S., Kalashnikov I. E., Bykov P. A. Investigation of the diffusion zone formation mechanisms during the production of functional steel-aluminium compositions by arc processes / Materials Science Forum. 2022. Vol. 1052. P. 14 – 20. DOI: 10.4028/p-1k2d4m
- Ibragim A. B., Al-Badour F. A., Adesina A. Y., Merah N. Effect of process parameters on microstructural and mechanical properties of friction stir diffusion clad ASTM A516-70 steel using 5052 Al alloy / Journal of Manufacturing Processes. 2018. Vol. 34. P. 451 – 462. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.06.020
- Sahoo D. K., Mohanty B. S., Pradeep A. M. V., John A. D. An experimental study on friction surfaced coating of aluminium 6063 over AISI 316 stainless steel substrate / Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 40. P. 510 – 518. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.03.251
- Kallien Z., Klusemann B. Combined experimental-numerical analysis of the temperature evolution and distribution during friction surfacing / Surface and coatings technology. 2022. Vol. 437. P. 12850. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2022.128350
- Seidi E., Miller S. F. A novel approach to friction surfacing: experimental analysis of deposition from radial surface of a consumable tool / Coatings. 2020. Vol. 10. P. 1016 – 1033. DOI: 10.3390/coatings10111016
- Kallien Z., Rath L., Roos A., Klusemann B. Experimentally established correlation of friction surfacing process temperature and deposit geometry / Surface and Coatings Technology. 2020. Vol. 397. P. 126040. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.126040
- Pirhayati P., Aval H. J. Phase-field microstructure simulation during aluminum alloy friction surfacing / Surface and Coating Technology. 2020. Vol. 402. P. 126496. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.126496
- Bararpour S. M., Aval H. J., Jamaati R. Modeling and experimental investigation on friction surfacing of aluminum alloys / Journal of Alloys and Compounds. 2019. Vol. 805. P. 57 – 68. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.07.010
- Zhang S., Chen G., Liu Q., et al. Numerical analysis and analytical modeling of the spatial distribution of heat flux during friction stir welding / Journal of Manufacturing Processes. 2018. Vol. 33. P. 245 – 255. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.05.021
- Anand R. S., Prakash P., Jha S. K., Singh A. K. Numerical investigations of effect of input process parameters on heat generation in friction stir welding / Materials Today: Proceedings. 2020. Vol. 33. P. 5354 – 5361. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.03.113
- Logesh M., Kumar D. V., Shankaranarayana R., et al. A numerical analysis of friction stir welded joint using FEA / Materials Today: Proceedings. 2022. Vol. 62. P. 2362 – 2369. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.04.850
- Mikheev R. S., Kalashnikov I. E. Using mathematical methods for analysis of temperature — time conditions of arc surfacing upon manufacturing of steel-aluminum compositions / Inorganic Materials. 2022. Vol. 58. N 15. P. 1594 – 1603. DOI: 10.1134/S0020168522150092