



*The mathematical model of the process of diffusion silvering of reinforcing layer on steel articles, reflecting interference of main technological parameters of the process is developed. Algorithm of solving of Stefan problem at not specified initially temperature of contact of billet and crystallized melt is offered.*

А. В. АЛИФАНОВ, ФТИ НАН Беларуси, Г. Ф. БЕТЕНЯ, БГАТУ,  
В. М. ГОЛУБ, ФТИ НАН Беларуси

УДК 631.31.022: 621.785.92: 621.791.92

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ФОРМИРОВАНИЯ УПРОЧНЯЮЩЕГО СЛОЯ В ПРОЦЕССАХ УПРОЧНЕНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ НАМОРАЖИВАНИЯ

### Введение

В последнее время усиливается тенденция применения эффективных прогрессивных методов повышения ресурса работы деталей ответственного назначения различных машин, механизмов, оборудования и т. д. Особенно востребованы подобные методы в отрасли сельскохозяйственного машиностроения. В частности, перед этой отраслью поставлена задача значительного повышения износостойкости почворезущих элементов, кормоуборочных и кормоперерабатывающих ножей и т. д. Среди прочих известных методов упрочнения и восстановления указанных выше изделий выгодно отличается процесс намораживания благодаря своей простоте и эффективности. Однако литература, посвященная этому процессу, в недостаточной мере раскрывает механизм формирования упрочняющего слоя, в частности, влияние температур расплава и заготовки, толщины заготовки и времени ее контактирования с расплавом на толщину нанесенного упрочняющего слоя. Данная работа посвящена выявлению этих закономерностей и базируется на большом экспериментальном материале, накопленном в Белорусском государственном аграрном техническом университете [1, 2].

### Сущность метода намораживания упрочняющего слоя

Метод наплавки упрочняющего слоя намораживанием включает в себя операции расплавления упрочняющего металла, активации наплавляемой поверхности заготовки, наплавки рабочей поверхности заготовки путем погружения в расплав упрочняющего металла (погружение, крат-

ковременная выдержка, извлечение), охлаждение изделия [1, 2]. К особенностям приведенных выше операций относится то, что рабочая температура расплава должна быть на 30–50 К выше температуры плавления упрочняющего металла; активация наплавляемой поверхности заготовки осуществляется путем нанесения на нее флюса и нагрева до температуры 1123–1173 К (температуры плавления флюса) с целью очищения поверхности от оксидов и других загрязнений; выдержка заготовки в расплаве; охлаждение наплавляемой заготовки на воздухе. При этом основными параметрами, влияющими на процесс намораживания, являются температура активации поверхности заготовки, температура расплава, толщина заготовки и продолжительность ее контактирования с расплавом. Чтобы регулировать толщину наплавляемого упрочняющего слоя металла, надо изменять указанные параметры процесса. Чтобы эти изменения принесли ожидаемый результат, необходимо исследовать влияние каждого параметра на механизм формирования упрочняющего слоя, а также изучить особенности теплопередачи между заготовкой и расплавом в процессе его затвердевания.

На рис. 1, а, б показаны принципиальные схемы активации поверхности заготовки и наплавки намораживанием [1].

### Тепловая модель процесса кристаллизации при двусторонней наплавке пластины методом диффузионного намораживания

Сформулируем математическую модель процесса направленной двусторонней кристаллизации при диффузионной наплавке намораживанием

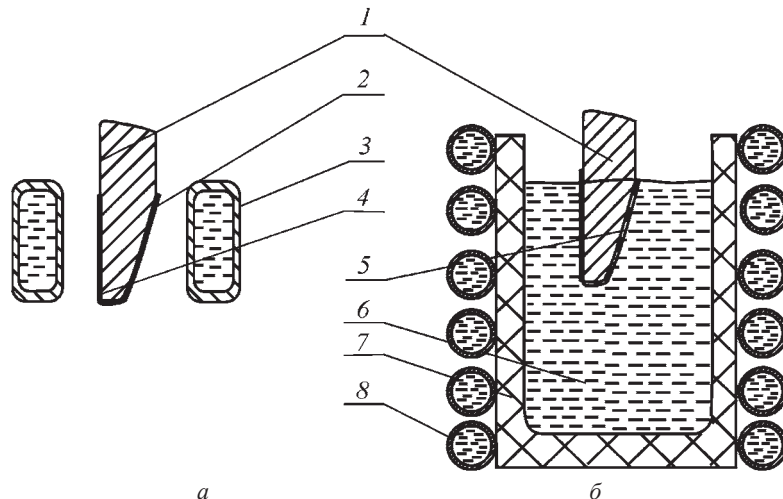


Рис. 1. Принципиальная схема метода намораживания: *a* — активация поверхности изделия; *б* — наплавка упрочняющего металла на рабочую поверхность упрочняемого изделия (1 — упрочняемое изделие; 2 — флюс; 3 — индуктор; 4 — теплоизоляционное покрытие; 5 — наплавленный сплав; 6 — расплав; 7 — тигель; 8 — индуктор плавильной печи)

в одномерном случае. Имеется система, состоящая из кристаллизатора (заготовки) толщиной  $l$ , занимающего область  $-l \leq x \leq 0$ , и материала расплава, находящегося в твердой (области  $0 \leq x \leq y_1(t)$  и  $-y_2(t) - l \leq x \leq -l$ ) и жидкой (полупространства  $x \geq y_1(t)$  и  $-\infty \leq x \leq -y_2(t) - l$ ) фазах. Переменные  $y_1(t)$  и  $y_2(t)$  определяют положение фронта кристаллизации (толщину наплавленного слоя) на одной из поверхностей заготовки в данный момент времени  $t$ . В начальный момент твердая фаза отсутствует, т. е.  $y_1(0) = 0$ ,  $y_2(0) = -l$ . Вдали от фронта кристаллизации ( $x \ll -y_2(t)$  и  $x \gg y_1(t)$ ) сохраняется начальная температура жидкости  $T_{ж0}$ , более высокая, чем температура кристаллизации  $T_{кр}$  расплава. Последнее условие допустимо с учетом того, что размер наплавочной ванны значительно превосходит толщину заготовки и происходит постоянный индукционный разогрев расплава. Требуется отыскать температурные поля в заготовке, твердой и жидкой фазах, а также закон изменения размеров и формы области, занятой твердой фазой.

Ввиду симметрии задачи относительно плоскости  $x = -l/2$  допустимо рассматривать динамику процесса кристаллизации в одном из полупространств с учетом тождественности тепловых условий на противоположных поверхностях заготовки. Если считать, что теплопередача во всех областях осуществляется по закону теплопроводности Фурье и не принимать во внимание температурную зависимость теплофизических характеристик сосуществующих сред, то температурное поле в системе будет описываться следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{\partial T_3(x,t)}{\partial t} = a_3 \frac{\partial^2 T_3(x,t)}{\partial x^2}, \quad -l \leq x \leq 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_m(x,t)}{\partial t} = a_m \frac{\partial^2 T_m(x,t)}{\partial x^2}, \quad 0 \leq x \leq y(t), \quad (2)$$

$$\frac{\partial T_{ж}(x,t)}{\partial t} = a_{ж} \frac{\partial^2 T_{ж}(x,t)}{\partial x^2}, \quad y(t) \leq x \leq \infty. \quad (3)$$

Здесь  $T_3(x, t)$ ,  $T_m(x, t)$  и  $T_{ж}(x, t)$  — температуры заготовки, затвердевшей и жидкой фаз расплава;  $a_i = \lambda_i / c_i \rho_i$  — соответствующие коэффициенты температуропроводности ( $\lambda_i$  — коэффициент теплопроводности,  $c_i$  — удельная теплоемкость,  $\rho_i$  — плотность). В момент  $t = 0$  твердая фаза отсутствует, а заготовка и расплав имеют начальные температуры соответственно ниже и выше температуры кристаллизации  $T_{кр}$ :

$$T_3(x, 0) = T_{30} < T_{кр}, \quad T_{ж}(x, 0) = T_{ж0} > T_{кр}. \quad (4)$$

Граничные условия задачи сформулируем следующим образом:

$$T_3(-l, t) = T_m(-l, t) = T_n(-l, t), \quad (5)$$

$$\begin{aligned} T_3(0, t) &= T_m(0, t) = T_n(0, t), \\ \lambda_3 \frac{\partial T_3(0, t)}{\partial x} &= \lambda_m \frac{\partial T_m(0, t)}{\partial x}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$T_m(y(t), t) = T_{ж}(y(t), t) = T_{кр}, \quad (7)$$

$$\lambda_m \frac{\partial T_m(y(t), t)}{\partial x} - \lambda_{ж} \frac{\partial T_{ж}(y(t), t)}{\partial x} = Q \rho_m \frac{dy(t)}{dt}, \quad (8)$$

$$T_{ж}(\infty, t) = T_{ж0}, \quad \frac{\partial T_{ж}(\infty, t)}{\partial x} = 0, \quad (9)$$

где  $Q$  — удельная скрытая теплота кристаллизации материала расплава.

Система уравнений (1)–(9) представляет собой так называемую задачу Стефана — уравнение теплопроводности со свободной границей при на-

личии на ней фазовых превращений [3–7]. С математической точки зрения краевые задачи для уравнений параболического типа в области с движущейся границей принципиально отличны от классических (для областей цилиндрического типа). Вследствие зависимости границы области от времени к этому классу задач в общем случае не применимы методы разделения переменных и интегральных преобразований Фурье–Ханкеля–Лапласа, поскольку, оставаясь в рамках классических методов математической физики, не удастся согласовать решение уравнения теплопроводности с движением границы теплопереноса. Одним из наиболее эффективных методов решения задачи Стефана для области твердой фазы ( $0 \leq x \leq y(t)$ ) является предложенный в [3] и получивший дальнейшее развитие в [5, 7] метод дифференциальных рядов. Его практическое использование предполагает вычисление производных любого порядка от выражений специального вида в общем члене ряда. Метод дает возможность получить аналитическое решение краевой задачи теплопроводности в области с подвижной границей при любом виде граничных условий. Распределение температуры в наплавленном слое, получаемое при использовании этого метода, определяется по следующему выражению:

$$T_m(x, t) = T_m(y(t), t) + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{a_m^{n+1}} \frac{d^n}{dt^n} \left[ \frac{[y(t) - x]^{2n+2}}{(2n+2)!} \frac{dT_m(y(t), t)}{dt} \right] - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{a_m^n} \frac{d^n}{dt^n} \left[ \frac{[y(t) - x]^{2n+1}}{(2n+1)!} \frac{dT_m(y(t), t)}{dx} \right]. \quad (10)$$

Уравнение (10) можно назвать обобщенным рядом Коши для уравнения (2), когда условия Коши задаются на аналитической кривой  $x = y(t)$ . Для случая вырожденной области ( $y(0) = 0$ ) метод дифференциальных рядов дает эффективные соотношения для нахождения неизвестного закона движения границы, что означает фактическое решение прямых задач стефановского типа. Для начала проведем преобразования выражения (10) применительно к конкретной поставленной задаче (1)–(9). Условие (7) (постоянство температуры на границе фазового перехода) дает  $\frac{dT_m(y(t), t)}{dt} = 0$ . Значение величины  $\frac{dT_m(y(t), t)}{dx}$  определим из условия (8). Распределение температуры в жидкой фазе расплава при условиях (9) определяется по известному уравнению [3]:

$$T_{ж}(x, t) = T_{ж0} - (T_{ж0} - T_{кр}) \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_{ж}t}}\right)}{\operatorname{erfc}\left(\frac{y(t)}{2\sqrt{a_{ж}t}}\right)}. \quad (11)$$

Тогда из (8) и (11) получаем выражение для градиента температуры в твердой фазе на поверхности кристаллизации:

$$\frac{dT_m(y(t), t)}{dx} = \frac{Q\rho_m}{\lambda_m} \frac{dy(t)}{dt} + \frac{T_{ж0} - T_{кр}}{\sqrt{\pi a_{ж}t}} \frac{\exp\left(-\frac{y(t)^2}{4a_{ж}t}\right)}{\operatorname{erfc}\left(\frac{y(t)}{2\sqrt{a_{ж}t}}\right)}. \quad (12)$$

Теперь для определения характера движения границы затвердевания необходимо рассмотреть тепловые условия на неподвижной границе. Температура в плоскости контакта заготовки и затвердевшего расплава будет определяться следующим образом:

$$T_3(0, t) = T_m(0, t) = T_{кр} - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{a_m^n} \frac{d^n}{dt^n} \left[ \frac{[y(t) - x]^{2n+1}}{(2n+1)!} \frac{dT_m(y(t), t)}{dx} \right]. \quad (13)$$

Проблема состоит в том, что в уравнение (13) входят две неизвестные переменные функции: функция изменения температуры на поверхности контакта заготовки и кристаллизовавшегося расплава  $T_n(0, t)$  и функция движения границы фазового перехода  $y(t)$ , которые взаимосвязаны между собой. Для установления еще одной связи между искомыми величинами, характеризующими развитие процесса диффузионного намораживания, используем условие равенства тепловых потоков на границе контакта (6). Тогда, учитывая выражения (10) и (12), получаем

$$\lambda_{\tau} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{a_m^{n+1}} \left\{ \frac{d^{n+1}}{dt^{n+1}} \left[ \frac{y(t)^{2n+1}}{(2n+1)!} \frac{Q}{c_m} \right] + \frac{d^n}{dt^n} \left[ \frac{y(t)^{2n}}{2n!} \frac{a_m(T_{ж0} - T_{кр})}{\sqrt{\pi a_{ж}t}} \frac{\exp\left(-\frac{y(t)^2}{4a_{ж}t}\right)}{\operatorname{erfc}\left(\frac{y(t)}{2\sqrt{a_{ж}t}}\right)} \right] \right\} = \lambda_3 \frac{\partial T_3(0, t)}{\partial x}. \quad (14)$$

Уравнение (14) устанавливает связь скорости нарастания наплавленного слоя еще не непосред-

ственно с температурой контакта, а с ее градиентом. Для дальнейшего решения задачи разобьем весь рассматриваемый временной отрезок на некоторые достаточно малые интервалы времени  $\Delta t$ , на которых температуру поверхности будем считать постоянной  $T_n(0, t) = T_{n1} = \text{const}$ . Тогда для температурного поля заготовки на первом интервале имеем

$$\frac{\partial T_3(x, t)}{\partial t} = a_3 \frac{\partial^2 T_3(x, t)}{\partial x^2}, \quad -l \leq x \leq 0, \quad (15)$$

$$T_3(x, 0) = T_{30}, \quad T_3(0, t) = T_3(-l, t) = T_{n1}. \quad (16)$$

Применив к системе (15)–(16) интегральное преобразование Лапласа [5, 8], получим величину теплового потока через границу контакта кристаллизатора и затвердевшей фазы расплава:

$$\lambda_3 \frac{dT_3(0, t)}{dx} = \lambda_3 \frac{T_{n1} - T_{30}}{\sqrt{\pi a_3 t}} \times \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \left( \exp\left(-\frac{(nl)^2}{a_3 t}\right) - \exp\left(-\frac{((n+1)l)^2}{a_3 t}\right) \right). \quad (17)$$

Последовательно используя описанную процедуру для каждого  $i$ -го интервала времени, получаем уравнение для определения величины теплоотода от затвердевшего расплава к заготовке в произвольный момент времени  $t = i\Delta t$ :

$$\lambda_3 \frac{dT_3(0, t)}{dx} = \lambda_3 \sum_{j=1}^i \frac{\Delta T_{nj}}{\sqrt{\pi a_3 k \Delta t}} \times \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \left( \exp\left(-\frac{(nl)^2}{a_3 k \Delta t}\right) - \exp\left(-\frac{((n+1)l)^2}{a_3 k \Delta t}\right) \right), \quad (18)$$

где  $\Delta T_{n1} = T_{n1} - T_{30}$ ,  $\Delta T_{nj} = T_{nj} - T_{n(j-1)}$ ,  $j = \overline{2, n}$ ,  $k = i + 1 - j$ .

Теперь, принимая кубический характер зависимости температуры в затвердевшем слое расплава от расстояния от фронта кристаллизации ( $n=1$  в (13) и (14)) и используя уравнения (14) и (18), приходим к дифференциальному уравнению для определения величины  $y(i\Delta t)$  (аргумент  $i\Delta t$  в уравнении для краткости записи опущен и подразумевается, что  $t = i\Delta t$ ):

$$\begin{aligned} & Q\rho_m \left( \dot{y} + \frac{2y\dot{y}^2 + y^2\ddot{y}}{2a_m} \right) + \\ & + \frac{b_{\text{ж}}(T_{\text{ж}0} - T_{\text{кр}}) \exp\left(-\frac{y^2}{4a_{\text{ж}}t}\right)}{\sqrt{\pi t} \operatorname{erfc}\left(\frac{y}{2\sqrt{\pi a_{\text{ж}}t}}\right)} \times \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \times \left( 1 + \frac{y\dot{y}}{a_m} - \frac{y^2}{4a_{\text{ж}}t} + \frac{y^4 - 2y^3\dot{y}t}{8a_{\text{ж}}a_{\text{ж}}t^2} - \right. \\ & \left. - \frac{(2y^3 - y^2\dot{y}t) \exp\left(-\frac{y^2}{4a_{\text{ж}}t}\right)}{2a_m \sqrt{\pi a_{\text{ж}}t^3} \operatorname{erfc}\left(\frac{y}{2\sqrt{\pi a_{\text{ж}}t}}\right)} \right) = b_m \sum_{j=1}^i \frac{\Delta T_{nj}}{\sqrt{\pi k \Delta t}} \times \\ & \times \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \left( \exp\left(-\frac{(nl)^2}{a_3 k \Delta t}\right) - \exp\left(-\frac{((n+1)l)^2}{a_3 k \Delta t}\right) \right), \quad (19) \end{aligned}$$

где  $b_i = \sqrt{\lambda_i c_i \rho_i}$  – коэффициент тепловой аккумуляции материалов заготовки и расплава;

$$\dot{y} = \frac{y((i+1)\Delta t) - y((i-1)\Delta t)}{2\Delta t} \approx \frac{dy(i\Delta t)}{dt};$$

$$\ddot{y} = \frac{y((i+1)\Delta t) - 2y(i\Delta t) + y((i-1)\Delta t)}{\Delta t^2} \approx \frac{d^2 y(i\Delta t)}{dt^2}.$$

Определив с помощью численного решения уравнения (19) толщину и скорость роста наплавленного слоя в данный момент времени, можно найти соответствующую этим параметрам процессу температуру поверхности заготовки из уравнения (13):

$$\begin{aligned} T_3(0, t) = T_{\text{кр}} - & \left( \frac{Q\rho_m}{\lambda_m} \frac{dy}{dt} + \frac{T_{\text{ж}0} - T_{\text{кр}}}{\sqrt{\pi a_{\text{ж}}t}} \frac{\exp\left(-\frac{y^2}{4a_{\text{ж}}t}\right)}{\operatorname{erfc}\left(\frac{y}{2\sqrt{\pi a_{\text{ж}}t}}\right)} \right) \times \\ & \times \left( y + \frac{y^2\dot{y}}{2a_m} \right) - \\ & - \left( \frac{Q\rho_m}{\lambda_m} \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{T_{\text{ж}0} - T_{\text{кр}}}{2\sqrt{\pi a_{\text{ж}}t^3}} \frac{\exp\left(-\frac{y^2}{4a_{\text{ж}}t}\right)}{\operatorname{erfc}^2\left(\frac{y}{2\sqrt{\pi a_{\text{ж}}t}}\right)} \right) \times \\ & \times \left( \left( \frac{y^2 - 2y\dot{y}t}{2a_{\text{ж}}t} - 1 \right) \operatorname{erfc}\left(\frac{y}{2\sqrt{\pi a_{\text{ж}}t}}\right) + \frac{y - 2\dot{y}t}{\sqrt{\pi a_{\text{ж}}t}} \right) \frac{y^3}{6a_m}. \quad (20) \end{aligned}$$

Таким образом, алгоритм самосогласованного решения поставленной задачи следующий.

1. Ввод исходных данных (теплофизические характеристики материалов заготовки и расплава, величины удельной теплоты кристаллизации расплава, начальных температур детали (температура активации) и расплава, температуры кристаллизации, геометрических параметров наплавления



мой детали, величины временного интервала и критерия точности поверхностной температуры для схемы численного расчета) и задание начальной температуры на поверхности контакта.

2. Определение толщины наплавленного слоя для данного момента времени численным решением уравнения (19).

3. Расчет новой температуры поверхности с помощью уравнения (20) и проверка ее удовлетворения критерию точности.

4. Критерий точности не выполняется – перепределение поверхностной температуры и переход к п. 2 при новой температуре контакта. Критерий точности выполняется – переход к п. 2 на следующем временном интервале.

Уравнения (19)–(20) являются самосогласованным численным решением системы (1)–(9) и описывают динамику роста наплавленного слоя в зависимости от различных исходных параметров: разницы между температурой кристаллизации и начальной температурой заготовки (температурой активации)  $\Delta T_a = T_{кр} - T_{з0}$ , перегрева расплава  $\Delta T_p = T_{ж0} - T_{кр}$ , геометрических размеров заготовки, времени контактирования заготовки и расплава и их теплофизических характеристик.

### Исследование влияния основных технологических параметров процесса намораживания на динамику формирования наплавленного слоя

На основе разработанной схемы были проведены численное моделирование процесса двустороннего диффузионного намораживания и исследование влияния технологических параметров процесса на динамику формирования наплавлен-

ного слоя. В качестве модельных материалов выбраны материал заготовки – сталь 20, материал расплава – серый чугун СЧ18. Теплофизические характеристики для них приняты по данным [9, 10] (для стали  $\lambda_3 = 27,7$  Вт/(м·К),  $\rho_3 = 7550$  кг/м<sup>3</sup>,  $c_3 = 695$  Дж/(кг·К) и для расплава чугуна соответственно  $\lambda_m = 18,6$  Вт/(м·К),  $\rho_m = 7200$  кг/м<sup>3</sup>,  $c_m = 837,4$  Дж/(кг·К)). Удельная скрытая теплота кристаллизации чугуна  $Q = 268$  КДж/кг [6]. За температуру фронта кристаллизации  $T_{кр}$  принята температура солидуса чугуна СЧ18, равная 1423 К [9]. Интервал времени, используемый в численной схеме, был принят равным 0,02 с, точность определения температуры контакта заготовки и затвердевшего расплава – 0,1 К. Результаты моделирования приведены на рис. 2–6.

Из рис. 2 видно, что максимальная величина наплавленного слоя увеличивается с увеличением величины  $\Delta T_a$  практически по линейному закону, причем с увеличением толщины заготовки увеличивается и достигаемая толщина наплавки. Однако следует учитывать, что снижение температуры активации (увеличение  $\Delta T_a$ ) ограничено величиной температуры плавления флюса и может негативным образом сказываться на качестве сцепления материалов заготовки и расплава. Поэтому необходим выбор оптимальных значений параметра  $\Delta T_a$  для достижения двух целей: получения наплавленного слоя необходимой толщины при качественном соединении его с деталью.

Анализ рис. 3 показывает, что увеличение перегрева расплава при одной и той же температуре активации ведет к уменьшению величины наплавленного слоя. В связи с этим очевидно, что предпочтительнее вести процесс диффузионного

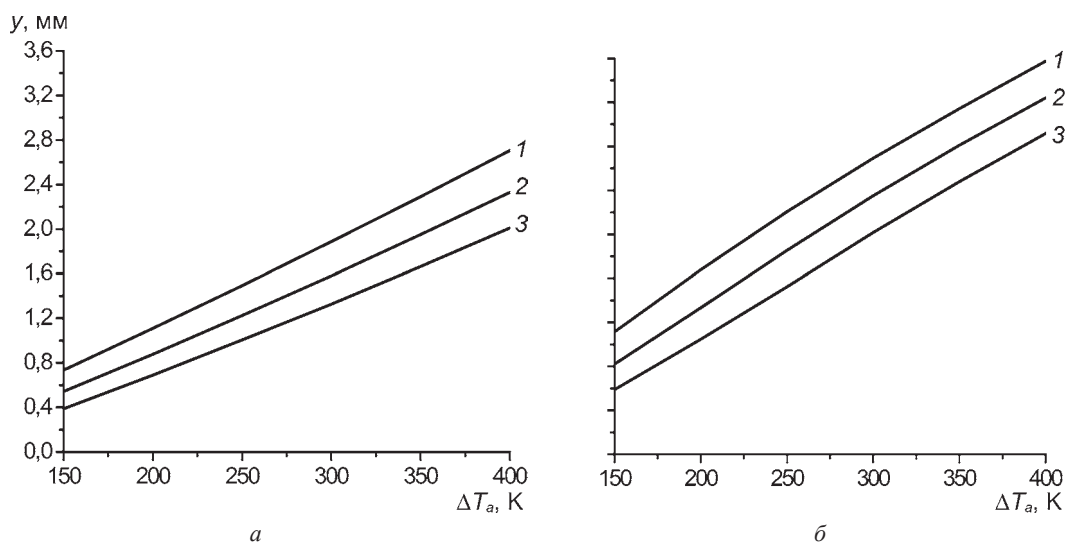


Рис. 2. Зависимость максимальной толщины кристаллизовавшегося слоя  $y$  от разницы между температурой кристаллизации и начальной температурой заготовки (температурой активации) при различных величинах перегрева расплава: 1 –  $\Delta T_p = 50$  К; 2 – 70, 3 – 90 К. Толщина пластины: а – 8 мм; б – 12 мм

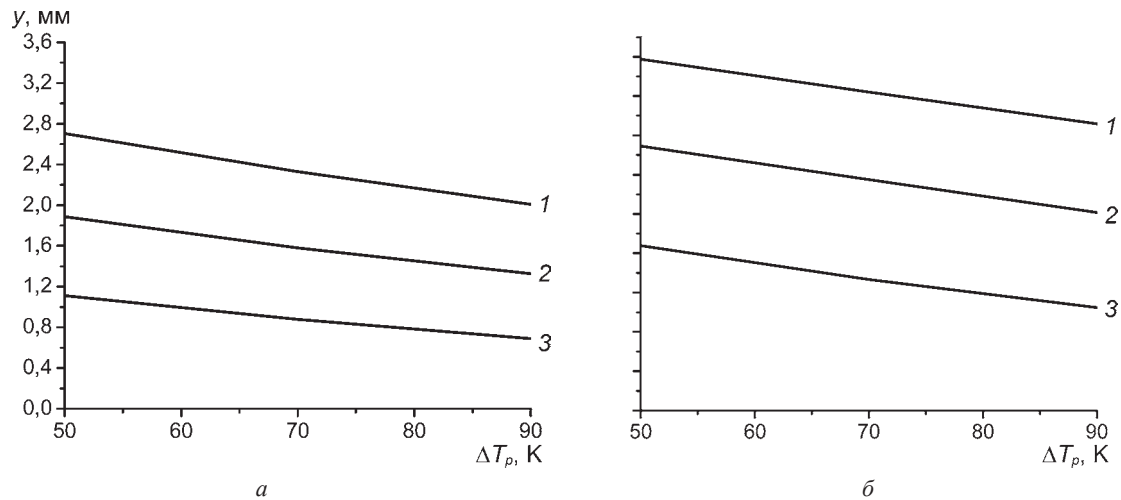


Рис. 3. Зависимость максимальной толщины кристаллизовавшегося слоя  $y$  от начального перегрева расплава при различных температурах активации заготовки: 1 –  $\Delta T_a = 400$  К; 2 – 300, 3 – 200 К. Толщина пластины: а – 8 мм; б – 12 мм

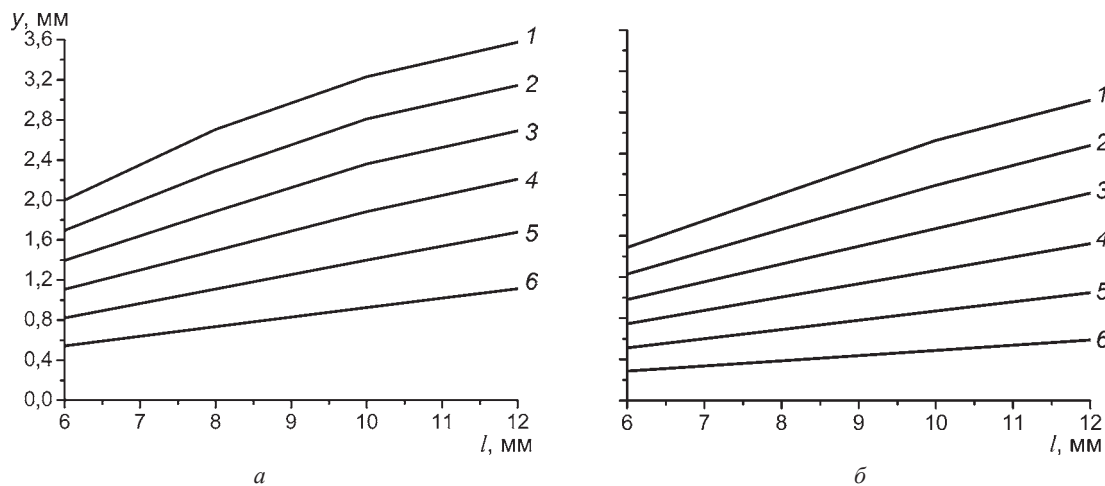


Рис. 4. Зависимость максимальной толщины кристаллизовавшегося слоя  $y$  от толщины наплавленной детали  $l$  при различных температурах активации заготовки: 1 –  $\Delta T_a = 400$  К; 2 – 350; 3 – 300; 4 – 250; 5 – 200; 6 – 150 К. Величина перегрева расплава: а –  $\Delta T_p = 50$  К; б –  $\Delta T_p = 90$  К

намораживания при температурах расплавленно-наплаваемого материала, максимально приближенным к температуре его кристаллизации. Значительное увеличение перегрева расплава, кроме того, приведет к возникновению конвективных потоков в нем, что отрицательно будет сказываться на качестве сцепления материала наплавки и подложки. С другой стороны, известно [2, 3, 10], что при прочих равных условиях способность расплава к смачиванию контактирующей поверхности, а, следовательно, к улучшению качества сцепления, с уменьшением температуры падает. Это обстоятельство будет накладывать ограничение на величину перегрева с нижней границы.

На рис. 4 приведены зависимости величины наплавленного слоя от толщины детали, подвергающейся наплавке, при различных температурных режимах. Как видно из рисунка, увеличение поперечного размера детали приводит и к увели-

чению толщины формируемого слоя. Это объясняется более медленным прогревом детали, имеющей большую толщину, что обеспечивает интенсивный теплоотвод на длительном промежутке времени и соответственно лучшие условия для затвердевания материала расплава. Причем указанная зависимость более отчетливо выражается при уменьшении температуры активации детали (увеличении параметра  $\Delta T_a$ ).

На рис. 5 приведены зависимости толщины наплавленного слоя от времени контактирования расплава с заготовкой при различных исходных температурных условиях. Из рисунка видно, что на начальном этапе интенсивность наращивания твердой фазы происходит со значительной интенсивностью. В дальнейшем скорость роста наплавки уменьшается и в некоторый момент времени, зависящий от выбранного температурного режима процесса, практически прекращается. Таким образом, на основе полученных расчетных дан-

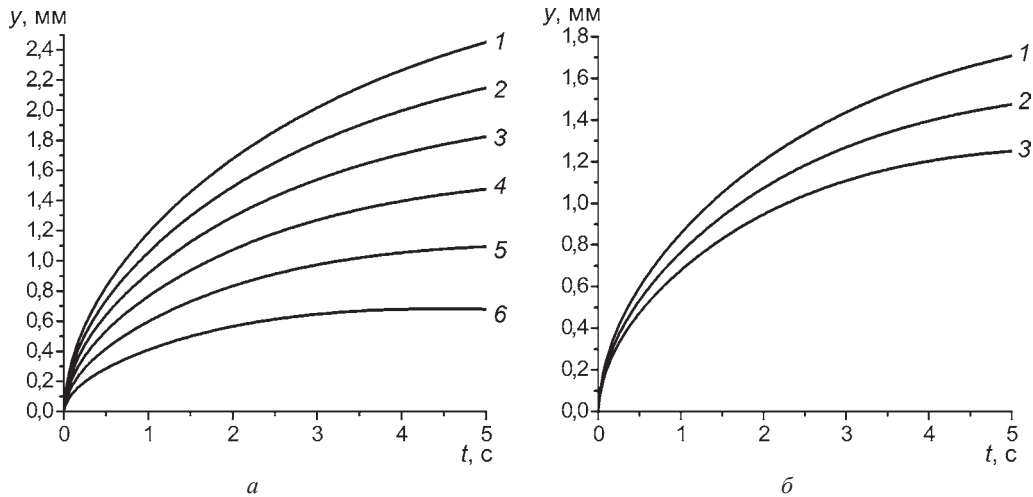


Рис. 5. Динамика роста наплавленного слоя при двустороннем диффузионном намораживании на пластину толщиной 10 мм при различных температурных режимах процесса: а –  $\Delta T_p = 70$  К (1 – 400 К; 2 – 350; 3 – 300; 4 – 250; 5 – 200; 6 – 150); б –  $\Delta T_a = 250$  К (1 –  $\Delta T_p = 50$  К; 2 – 70 К; 3 – 90 К)

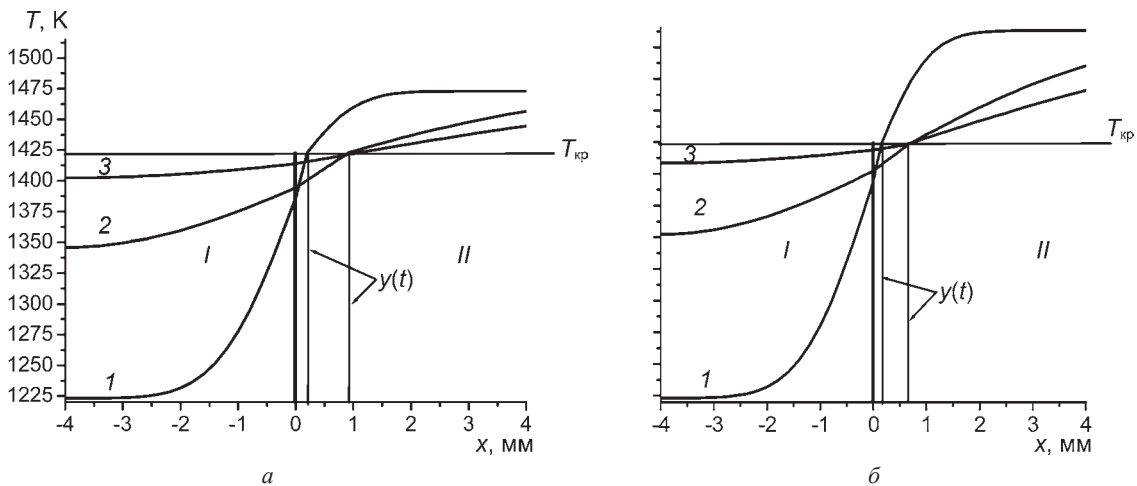


Рис. 6. Распределение температуры в системе заготовка – наплавленный слой – расплав при  $\Delta T_a = 200$  К и различных перегревах расплава (а –  $\Delta T_p = 50$  К; б –  $\Delta T_p = 90$  К) в разные моменты времени контактирования заготовки и расплава (1 – 0,1 с; 2 – 2; 3 – 5 с). Толщина пластины – 8 мм; I – заготовка; II – расплав;  $y(t)$  – положение фронта кристаллизации

ных может быть оптимально выбран такой параметр процесса, как время нахождения детали в расплаве.

На рис. 6 показано изменение температурного распределения в системе деталь – твердая фаза – жидкая фаза (в силу симметрии задачи температура в заготовке показана до половины ее толщины). Из рисунка видно, что на начальном этапе процесса температура контакта заготовки и наплавленного слоя принимает некоторое значение, близкое к  $T_{кр}$ , и на его протяжении практически сохраняется постоянной. На этом этапе происходит проникновение тепла в глубь изделия. В определенный момент времени температура контакта начинает расти и начинается этап общего нагрева заготовки. На первом этапе происходит быстрый рост наплавленного слоя. На втором этапе он практически прекращается и происходит интенсивный разогрев твердой фазы, что может

приводить к значительному ухудшению эксплуатационных свойств наносимого покрытия. Поэтому промежуток времени, соответствующий постоянству температуры поверхности заготовки, можно определить как максимальное время нахождения изделия в расплаве.

### Выводы

1. Разработана математическая модель процесса диффузионного намораживания упрочняющего слоя на стальные изделия, отражающая взаимодействие основных технологических параметров процесса (температуры активации упрочняемой поверхности изделия, температуры расплава упрочняющего материала, времени контактирования изделия с расплавом, толщины наплавленной детали, теплофизические характеристики материалов детали и расплава). Предложен алгоритм решения задачи Стефана при не задаваемом

мых изначально температуре контакта заготовки и кристаллизовавшегося расплава или функции движения границы фазового перехода. Эти взаимосвязанные характеристики процесса определяются с помощью итерационной процедуры самосогласования.

2. Проведено аналитическое исследование влияния этих параметров на динамику формирования наплавленного слоя с целью определения оптимальных параметров процесса. Выявлено, что процесс диффузионного намораживания с теплофизической точки зрения выгоднее вести при минимальных температурах перегрева расплава и активации заготовки. Однако на практике уменьшение температуры активации ограничено температурой плавления флюса, а значительное уменьшение температуры расплава приводит

к ухудшению смачивания последним поверхности заготовки. Поэтому можно рекомендовать вести процесс при температурах активации, несколько превышающих температуру плавления флюса, и перегревах расплава, составляющих 50–100 К.

3. Установлено, что наиболее интенсивно приращение толщины затвердевшего слоя происходит в результате пребывания заготовки в расплаве до 0,8–2,0 с (в зависимости от ее толщины и температурных режимов). Более длительная выдержка сопровождается лишь нагреванием детали по всему сечению без существенного увеличения наплавки. Это дает основание считать, что указанный интервал времени является оптимальным для выдержки заготовок рассмотренных толщин в расплаве.

### Литература

1. Б е т е н я Г. Ф. Повышение долговечности почворезущих элементов сельскохозяйственной техники наплавкой намораживанием. Мн.: БелНИИТИ, 1986.
2. Б е т е н я Г. Ф. Восстановление и упрочнение почворезущих элементов диффузионным намораживанием износостойкими сплавами. Мн.: БГАТУ, 2003.
3. Л ю б о в Б. Я. Теория кристаллизации в больших объемах. М.: Наука, 1975.
4. П а в л ю к е в и ч Н. В., Г о р е л и к Г. Е., Л е в д а н с к и й В. В., В. Г. Л е й ц и н а В. Г., Р у д и н Г. И. Физическая кинетика и процессы переноса при фазовых превращениях. Мн.: Наука и техника, 1980.
5. К а р т а ш о в Э. М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. М.: Высш. шк., 2001.
6. К а р т а ш о в Э. М. Аналитические методы решения краевых задач нестационарной теплопроводности в областях с движущимися границами // ИФЖ. 2001. Т. 74. № 2. С. 171–195.
7. К у д и н о в В. А., К а р т а ш о в Э. М., К а л а ш н и к о в В. В. Аналитические решения задач теплопереноса и термоупругости для многослойных конструкций. М.: Высш. шк., 2005.
8. Л ы к о в А. В. Теория теплопроводности. М.: Высш. шк., 1967.
9. Н е й м а р к Б. Е. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике. М.; Л.: Энергия, 1967.
10. В е й н и к А. И. Теория затвердевания отливок. М.: Гостехиздат, 1960.