

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАГРЕВА МЕТАЛЛА ПРИ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКЕ НЕПРЕРЫВНЫМ ОПЛАВЛЕНИЕМ

С. И. КУЧУК-ЯЦЕНКО, А. С. МИЛЕНИН, Е. А. ВЕЛИКОИВАНЕНКО, Е. В. АНТИПИН, А. В. ДИДКОВСКИЙ
ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В последнее десятилетие актуальной и практически значимой задачей является получение высококачественных соединений из высокопрочных сталей и сплавов. Для ее решения требуются технологии, которые отличаются высококонцентрированным нагревом при минимальном энергозатрате, в том числе и при контактной стыковой сварке железнодорожных рельсов непрерывным оплавлением. Для решения данной задачи была разработана математическая модель процесса нагрева металла при контактной стыковой сварке непрерывным оплавлением. Модель дает возможность избежать проведения трудоемких и дорогостоящих экспериментов и значительно расширить диапазон поиска путей оптимизации при многофакторном управлении параметрами сварки, влияющими, в частности, на формирование температурного поля при контактной стыковой сварке железнодорожных рельсов непрерывным оплавлением. Библиогр. 8, рис. 12.

Ключевые слова: непрерывное оплавление, единичный контакт, математическое моделирование, контактная стыковая сварка, плотность тока, коэффициент полезного действия, глубина кратера, искровой зазор, железнодорожный рельс

Контактная стыковая сварка непрерывным оплавлением (НО) широко используется в ведущих отраслях промышленности для соединения деталей из сталей и сплавов с различной площадью поперечного сечения. В соответствии с действующими нормативными документами [1] этот вид сварки рекомендуется для деталей с ограниченной толщиной элементов сечений, не превышающей 12...15 мм. Эти рекомендации базируются на опыте промышленного применения контактной сварки с использованием существующих технологий, не позволяющих, зачастую, обеспечить нагрев деталей большей толщины, необходимый для получения качественных соединений. Кроме этого, для возбуждения непрерывного оплавления таких изделий без подогрева сопротивлением необходимо дополнительное повышение мощности источника питания. Поэтому при сварке оплавлением деталей с большей толщиной рекомендуется контактная сварка оплавлением с предварительным подогревом сопротивлением.

В рамках исследований, которые проводились в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины в предыдущие годы, были определены основные параметры процесса НО, влияющие на нагрев и формирование температурного поля в зоне сварки [2]. Были предложены способы повышения энергетической эффективности процессов НО, в частности, позволяющие снизить потребляемую мощность и увеличить нагрев [3]. На базе этих исследований разработана технология сварки НО деталей с

большим поперечным сечением (более 1000 мм²) и толщиной более 200 мм, которая успешно используется в промышленности для сварки деталей различной толщины из низколегированных и жаропрочных сталей, алюминиевых сплавов.

В последнее десятилетие актуальной и практически значимой задачей является получение высококачественных соединений из высокопрочных сталей и сплавов. Для ее решения требуются технологии, которые отличаются высококонцентрированным нагревом при минимальном энергозатрате [4], в том числе, основанные на НО. Оптимизация таких процессов применительно к конкретным производственным циклам является длительным, трудоемким и дорогостоящим процессом, поэтому рационально сопутствующее использование различных методов математического и компьютерного моделирования процессов, определяющих свариваемость изделий и конструктивных элементов.

Такой подход позволяет значительно расширить диапазон поиска путей оптимизации при многофакторном управлении параметрами сварки, влияющими, в частности, на формирование температурного поля.

Цель настоящей работы — разработка математической модели кинетики температурного поля при НО с учетом многофакторного влияния на интенсивность нагрева быстро протекающих процессов образования и разрушения единичных контактов (ЕК), формирующихся при сварке, при-



Рис. 1. Внешний вид оплавленных поверхностей рельсов
менительно к характерному технологическому циклу НО железнодорожных рельсов.

В основу математической модели процесса нагрева при НО положено моделирование нагрева ЕК, образующихся при взаимодействии свариваемых деталей, сближаемых с заданной скоростью $v_{п}$. При их соприкосновении в местах, имеющих микронеровности, формируются контакты с очагами нагрева, где металл расплавляется и происходит локальный нагрев торцов свариваемых деталей. При нагреве и расплавлении каждого ЕК на поверхности оплавления формируются углубления-кратеры, образующие рельеф, отличающийся неравномерным распределением выступов и углублений (рис. 1).

На рис. 2 приведена запись параметров сварки, в том числе значений тока и напряжения при непрерывном оплавлении рельсов на режиме, принятом в производстве при сварке на машине К1000. Как видно из приведенных данных, при возбуждении оплавления ток $I_{св}$ в сварочной цепи резко изменяет свое значение. После сплавления

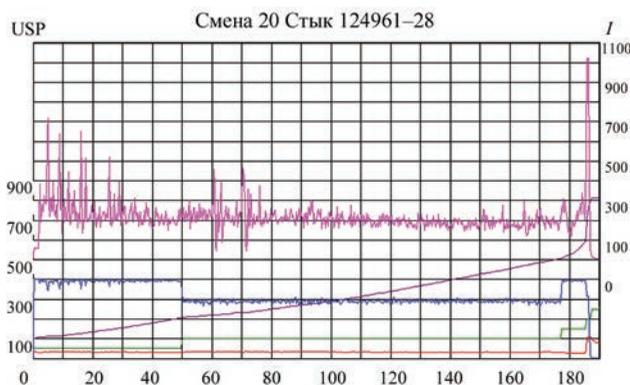


Рис. 2. Пример записи регистрации параметров процесса непрерывным оплавлением железнодорожных рельсов на стационарной рельсосварочной машине К1000

нескольких слоев контактирующих поверхностей на них образуется рельеф, определяемый площадью ЕК и кратеров, образующихся после их расплавления [5].

Между контактирующими поверхностями образуется искровой зазор Δ_3 , величина которого непостоянна (рис. 3). Количество одновременно существующих контактов в процессе оплавления значительно снижается, соответственно, снижаются общая площадь контактов и проходящий через них ток. Среднее значение сопротивления R_k в контакте между деталями и величина проходящего через них тока $I_{св}$ при оплавлении поддерживаются на достаточно стабильном уровне (см. рис. 2). При этом мгновенные значения тока I_{max} существенно отличаются от средних показателей $I_{ср}$. Отношение $I_{max}/I_{ср}$, характеризующее устойчивость процесса нагрева, достигает максимальных значений в начальный период возбуждения процесса и стабилизируется в конечный. Также значение $I_{max}/I_{ср}$ характерно ниже при сварке деталей с меньшей толщиной сечения. В свою очередь наличие импульсов повышения сварочного тока относительно его среднего значения обусловлено формированием контактов большой площади. Указанные зависимости формирования контактов большой площади связаны со специфическими особенностями оплавления, проявляющимися в явлении его саморегулирования. С увеличением площади ЕК и его проводимости возрастает генерируемая в нем тепловая энергия, что способствует его расплавлению и сокращению площади. Но это условие выполнимо при неограниченной мощности источника питания. В реальных условиях значение мгновенной мощности, генерируемой в искровом промежутке, определяется принятой величиной напряжения U_{2xx} и сопротивлением короткого замыкания сварочной цепи машины, что ограничивает диапазон изменения сопротивления контакта.

В процессе выплавления на контактирующих поверхностях мелких неровностей образуются относительно ровные участки, что создает условия

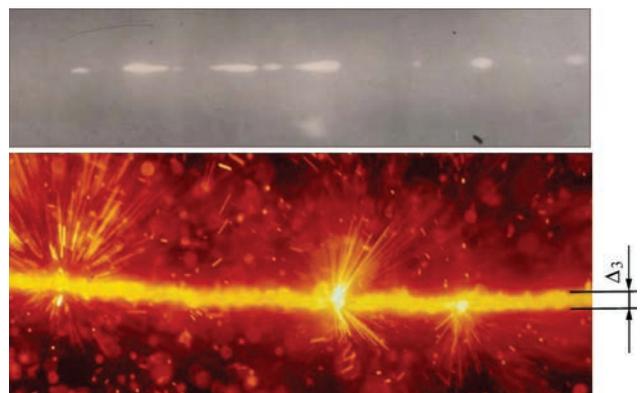


Рис. 3. Рентгенограмма искрового зазора при сварке рельсов

для формирования ЕК большой площади. Перед образованием электрического контакта по всей площади этих поверхностей наблюдается заполнение зазора между слоями расплавом металла, формирующегося при нагреве и расплавлении контактов на соседних участках. Через этот расплав при достаточно малом зазоре начинают формироваться и расплавляться отдельные контакты, площадь которых меньше возможной площади нового контакта. Явление вторичного плавления, как показано в работе [6], оказывает весьма существенное влияние на тепловой баланс при непрерывном оплавлении толстостенных деталей.

Величина Δ_3 изменяется в каждый период времени оплавления от 0 и до $\Delta_{3\max}$. С увеличением площади контактов увеличивается величина зазора, образующегося при их выплавлении, и на этом участке формирование новых контактов временно прекращается, а общее количество одновременно существующих контактов снижается. Соответственно, ток уменьшается до значения $I_{\text{опл.ср.}}$, которое поддерживается относительно постоянным и определяется скоростью подачи при оплавлении. Поэтому рельеф поверхности оплавления непрерывно изменяется, а средняя величина Δ_3 остается на постоянном уровне, как и средний ток при оплавлении, который определяется количеством одновременно существующих контактов. Отличительной особенностью этого процесса является формирование кратеров максимального размера. Глубина кратеров Δ_3 остается постоянной для каждого элементарного участка поверхности оплавления, которая определяется толщиной свариваемых изделий напряжением $U_{2\text{сх}}$.

Как видно из рис. 2 и рис. 3, в процессе оплавления толстостенных деталей на торцах могут образовываться контакты разных диаметров. Длительность нагрева таких контактов существенно зависит от их площади и значения проходящего через них тока (рис. 4). Для расчета времени существования единичных контактов диаметром 1...12 мм с площадью контактов от 0,79 до 113 мм² было принято значение тока $I = 10$ кА, в качестве конечной стадии нагрева ЕК — температура $T = 1800$ °С. Из анализа поверхностей оплавления можно определить, что в большей степени в процессе оплавления образуются контакты площадью от 20 до 50 мм², при этом плотность тока в них (рис. 2) поддерживается в пределах 200...300 А/мм².

Экспериментально установлено, что среднее значение плотности тока $\Delta i_{\text{св}}$, протекающего через деталь при оплавлении, определяется скоростью подачи (рис. 5) и зависит от толщины конструкции. С увеличением $v_{\text{п}}$ значение $\Delta i_{\text{св}}$ возрастает при одинаковых скоростях подачи и вторичного напряжения, подводимого к деталям

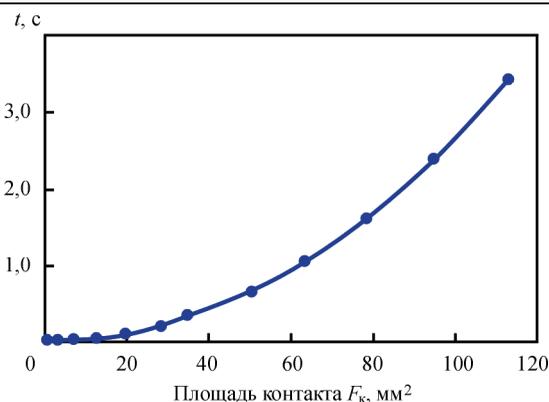


Рис. 4. Время существования ЕК в зависимости от его площади

$U_{2\text{сх}}$, плотность тока, протекающего в сварочной цепи, снижается при увеличении толщины деталей. Это обусловлено увеличением площади ЕК и образующихся кратеров после их расплавления, соответственно, увеличивается средняя величина искрового зазора Δ_3 и уменьшается количество одновременно существующих контактов. Эта зависимость имеет линейный характер при увеличении толщины свариваемых изделий от 5 до 30 мм, тогда как при больших толщинах деталей проявляется в меньшей степени. Поэтому при выборе типовых размеров моделируемых ЕК приняты контакты диаметром 5 и 8 мм, соответствующие толщинам свариваемых деталей в пределах 10...30 мм, для которых наиболее широко используется НО. Общее значение тока во вторичной цепи сварочного контура при сварке НО таких деталей на машинах, разработанных в ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, составляет 20...30 кА при напряжениях 4...7 В.

Экспериментально было установлено, что длительность нагрева ЕК определяется площадью и значением проходящего через него тока. Из анализа осциллограмм тока и напряжения видно, что часть времени существования контакта приходится на нагрев в жидком состоянии, сопровождающийся его расплавлением, кипением с резкими изменениями сопротивления. Поэтому для качественной и количественной оценки теплового баланса кроме общей

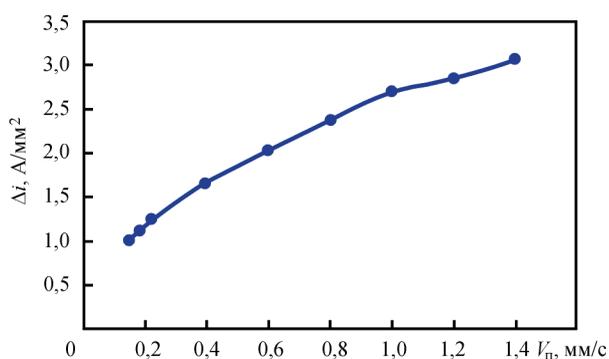


Рис. 5. Зависимость значения плотности тока от скорости подачи оплавливаемых деталей

длительности нагрева контакта t_k целесообразно рассмотреть также длительность нагрева в твердой фазе до температуры плавления t_{kl} его центральной части при $T = 1550$ °С и взрывообразующего разрушения при $T = 1800$ °С.

В большинстве случаев на границе контактов имеется зазор Δ_3 , величина которого может изменяться в зависимости от толщины оплавляемых деталей. Центральная часть контакта, нагреваемая до температуры плавления, представляет собой эллипсоид, ограниченный изотермами $T_{пл}$. При расплавлении ЕК часть жидкого расплава на границе ядра удерживается силами поверхностного натяжения и остается на поверхности кратера после разрушения контакта. Контакт, являющийся проводником тока в сварочной цепи, подвергается действию электродинамических сил, создающих в нем сжатие и взаимодействующих с мощным электромагнитным полем сварочной машины. Силы сжатия могут удерживать жидкий металл на участке контакта, увеличивая длительность его нагрева. Они же могут вызвать его перемещение в искровом зазоре, что наблюдается при определенных условиях оплавления [7]. Действие этих сил возрастает по мере увеличения Δ_3 , примыкающего к участку контакта. В большинстве случаев при оплавлении наблюдается взрывообразное разрушение ЕК. Экспериментально установлено, что температура металла, выбрасываемого при разрушении контактов, может изменяться от 1550 до 1800 °С, что соответствует температуре нагрева ядра. Установлено также, что более низкие температуры металла соответствуют нагреву ЕК большой площади ($F_k = 50$ мм²) при низких напряжениях U_{2xx} , а предельно высокие наблюдались при нагреве мелких контактов, сопровождающихся интенсивным испарением. Эти данные дают основание принять в расчетах, что центральная часть ЕК при нагреве до температуры $T_{пл}$ будет находиться в твердом состоянии, а его разрушение мо-

жет начаться при температурах, превышающих $T_{пл}$.

При разработке математической модели кинетики изменения температурного поля $T(x, y, t)$ в области ЕК было рассмотрено сечение размером L_x, L_y (рис. 6).

Так как основным физическим механизмом теплопередачи в рассматриваемом случае является процесс теплопроводности, то кинетика температурного поля описывается следующим соотношением [8]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) = c\gamma \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

где $c\gamma, \lambda$ — объемная теплоемкость и теплопроводность материала, соответственно.

Конвективный теплообмен с окружающей средой может быть описан с помощью уравнения Ньютона, т. е. граничные условия для рассматриваемой задачи (1) имеют следующий вид:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -\alpha(T - T_0) + q_s, \quad (2)$$

где n — нормаль к поверхности; T_0 — температура окружающей среды; α — коэффициент поверхностной теплоотдачи; q_s — удельная мощность нагрева на поверхности контакта.

В качестве начального условия принималось равномерное распределение температуры окружающей среды T_0 по всему рассматриваемому объему:

$$T(x, y, t) = T_0 \text{ при } t = 0. \quad (3)$$

При достижении в месте контакта некоторой критической температуры $T_{вбр}$, часть жидкого металла удалялась (происходит выброс).

В основу решения (1) положен метод конечных элементов, основанный на последовательном прослеживании во времени с шагом Δt распределения температур в свариваемой конструкции. На каждом шаге прослеживания (в момент времени t) находилось решение системы алгебраических уравнений, полученной в результате минимизации функционала \mathcal{E}_T по температурам в узлах сетки конечно-элементного разбиения (вариационный принцип Лагранжа):

$$\mathcal{E}_T = -\frac{1}{2} \int_S \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{c\gamma}{\Delta t} (T - T^*) \right] dS + \frac{1}{2} \int_{\Gamma} [\alpha(T - T_0) - q_s] d\Gamma, \quad (4)$$

где $T^* = T(x, y, t - \Delta t)$ — температурное поле в момент $t - \Delta t$; S — рассматриваемая общая площадь сечения в области ЕК; Γ — наружная граница расчетной области.

Производные $\partial T/\partial x, \partial T/\partial y$ выражаются для каждого конечного элемента через температуры в узлах.

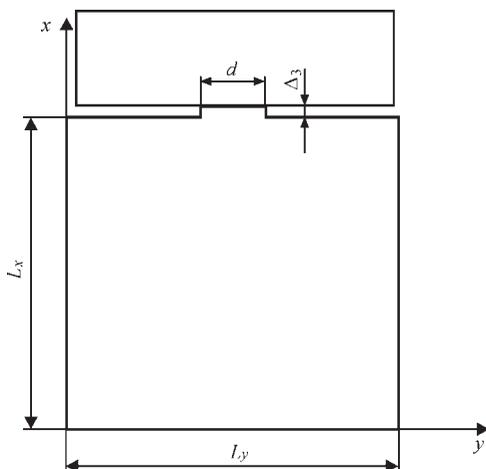


Рис. 6. Типовая схема нагрева единичных контактов диаметром 5 и 8 мм

Соответственно, интеграл по площади S , заменяется суммой интегралов по конечным элементам площади ΔS . Минимизация (4) означает равенство нулю производной $\partial \mathcal{E}_T / \partial T_{ij}$, $i = 1, \dots, M$; $j = 1, \dots, N$, где M — количество элементов разбиения по оси Ox , N — количество элементов по оси Oy .

На рис. 7 приведены зависимости времени существования ЕК различной площади, с момента появления и до взрыва, от плотности проходящего тока. Диапазон изменения Δi_k выбран в пределах экспериментальных данных, приведенных в работе [3], температура торцов контактирующих деталей в начальный период нагрева $T_0 = 20$ °С. Из приведенных данных можно сделать вывод о нелинейном влиянии плотности тока на время существования контакта, так как изменение площади ЕК незначительно изменяет время его существования, что объясняется локальностью процесса нагрева до температуры выброса. Длительность существования контактов различной площади снижается с увеличением плотности тока. При плотности тока более 400 А/мм² длительность нагрева контактов составляет сотые доли секунды и разрушение нагреваемого объема сопровождается интенсивным парообразованием. При меньших плотностях тока наблюдается увеличение длительности существования контактов, из чего следует большее влияние процессов теплопередачи в торцы контактирующих деталей и снижение скорости нагрева. При плотностях тока менее 100 А/мм² длительность нагрева контактов настолько возрастает, что последовательное выплавление образующихся контактов с заданной скоростью сближения торцов деталей становится невозможным. Процесс плавления переходит в нагрев сопротивлением, при котором площадь контактируемых участков прогрессирующе увеличивается и распространяется по всей площади контактирующих деталей. Поэтому значения Δi_k менее 100 А/мм² для указанных сварочных источников питания следует рассматривать как минимальные, при которых возможно возбуждение НО без подогрева торцов деталей. Таким образом, оплавление в диапазоне плотности тока в контактах 100...400 А/мм можно считать наиболее перспективным с точки зрения интенсификации сварочного нагрева без дополнительного воздействия на скорость сближения деталей, что является традиционно используемым средством регулирования нагрева при оплавлении. Увеличение длительности существования контактов при сохранении их общего количества и площади приводит к увеличению сварочного тока и прекращению плавления, переходу нагрева в режим короткого замыкания. Поэтому область значений плотности тока, отмеченная на рис. 7, может быть

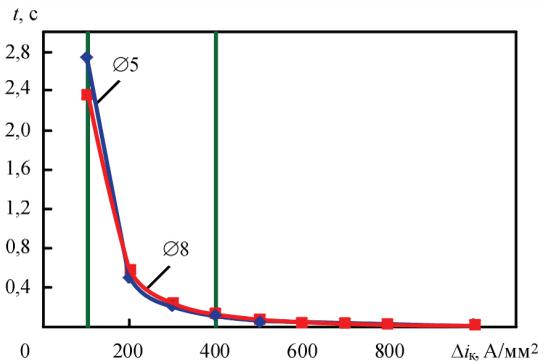


Рис. 7. Зависимость времени существования ЕК диаметром 5 и 8 мм от плотности тока Δi_k

определена как область неустойчивого оплавления при отсутствии систем автоматического регулирования сопротивления в контакте между деталями особенно на начальном периоде оплавления, когда температура торцов деталей низкая. Для приведенных условий нагрева контакта эта зона соответствует плотностям тока 150...200 А/мм².

Приведенный расчет выполнен для начальных условий оплавления, когда контактируют ненагретые торцы свариваемых деталей. С увеличением их температуры условия нагрева контактов меняются, и для их нагрева необходимо меньше энергии, соответственно, длительность существования контактов уменьшается (рис. 8). При нагреве торцов деталей до 800...900 °С диапазон рабочих плотностей тока в сварочной цепи может быть уменьшен до 150...200 А/мм². Этот прием успешно используется при выборе оптимальных программ снижения напряжения при непрерывном оплавлении. В основу построения программы положен принцип выполнения оплавления при минимально возможном в каждый период сварки напряжении. Это обеспечивает выполнение оплавления при плотностях тока в интервале 200...300 А/мм², а в отдельных случаях в конечный период оплавления — при плотности 150 А/мм².

Разработанный подход может быть использован для решения практических задач оптимизации промышленных циклов сварки, в частности, при

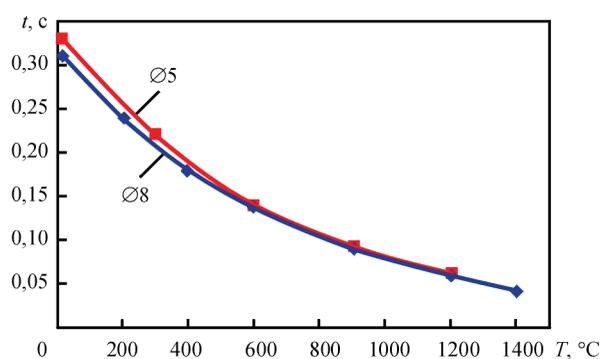


Рис. 8. Зависимость времени существования ЕК диаметром 5 и 8 мм от температуры оплавляемых торцов

оценке коэффициента полезного действия (КПД) процесса. Для этого необходимо дополнительно оценить потери тепла $q_{\text{пот}}$ в процессе сварки. Основными механизмами теплопотерь являются диссипация тепловой энергии в окружающую среду согласно (2), а также теплосодержание выброшенного жидкого металла, т. е.:

$$q_{\text{ном}} = V_{\text{вбр}} \int_{T_0}^{T_{\text{вбр}}} c\gamma dT + \iint_{\Gamma} \alpha(T - T_0) d\Gamma dt, \quad (5)$$

где $V_{\text{вбр}}$ — суммарный выброшенный объем металла.

Таким образом, КПД источника нагрева η в процессе сварки вычислялся как

$$\eta = \frac{q_{\text{ист}} - q_{\text{ном}}}{q_{\text{ист}}}, \quad (6)$$

где $q_{\text{ист}} = \int W dt$, W — тепловая мощность источника в области единичного контакта, которая была принята равной $0,035IU$ Вт, что соответствует наблюдаемым режимам при экспериментальных исследованиях температур во время сварки (I , U — ток и напряжение, подаваемые на свариваемую конструкцию).

Для расчета времени существования ЕК диаметром 5 и 8 мм было принято значение плотности тока $\Delta i = 250$ А/мм², в качестве конечной стадии нагрева — температура $T = 1800$ °С. Режимы нагрева в интервалах $100 \dots 400$ А/мм² представляют значительный интерес с точки зрения интенсификации нагрева при оплавлении, так как позволяют повысить сварочный ток и термический КПД процесса. На рис. 9 приведены зависимости термического КПД процесса оплавления согласно (6) при изменении плотности тока в контактах. Наиболее высокие значения термического КПД могут быть достигнуты в интервале величины $\Delta i = 100 \dots 400$ А/мм² независимо от площади контакта.

Кроме того, с помощью численного анализа распределения температур в процессе сварки исследовано влияние температуры оплавляемых торцов на величину термического КПД процесса сварки. Для этого был рассмотрен ЕК с проходящим через него током плотностью 250 А/мм². Как показано на рис. 10, при повышении температуры приконтактного слоя металла, где возникают ЕК, термический КПД процесса снижается. Это обусловлено тем, что энергия, передаваемая в торцы деталей, непрерывно снижается по мере увеличения температуры, а теряемая с выплавленным металлом остается постоянной и даже возрастает. Соответственно снижается термический КПД при нагреве оплавлением.

Полученные результаты численного анализа кинетики температурного поля в области ЕК могут быть использованы для рассмотрения ком-

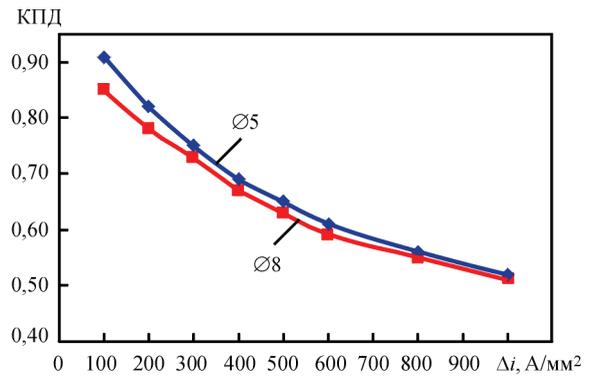


Рис. 9. Зависимость термического КПД нагрева контактов диаметром 5 и 8 мм от Δi , проходящего через ЕК

плекса задач оптимизации конкретных промышленных циклов, в частности, применительно к контактной сварке рельсов. Для расчета кинетики температуры T при сварке рельсов непрерывным оплавлением, как и для ЕК, использовался алгоритм численного решения трехмерного уравнения теплопроводности в декартовой системе координат x, y, z :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) = c\gamma \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (7)$$

Конвективный теплообмен с окружающей средой и начальные условия принимались такие же, как и при расчете ЕК согласно соотношениям (2) и (3). Функционал, минимизация которого позволяет сформировать необходимую систему линейных алгебраических уравнений в рамках конечно-элементного решения задачи теплопроводности, для данного случая представим в следующем виде:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_T = & -\frac{1}{2} \int_V \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \right. \\ & \left. - \frac{c\gamma}{\Delta t} (T - T^*) \right] dV + \frac{1}{2} \int_{\Gamma} \left[\alpha (T - T_0) - q_s \right] d\Gamma, \end{aligned} \quad (8)$$

где V — рассматриваемый объем в свариваемой конструкции.

Для расчета температурного поля использовались реальные данные, полученные при сварке

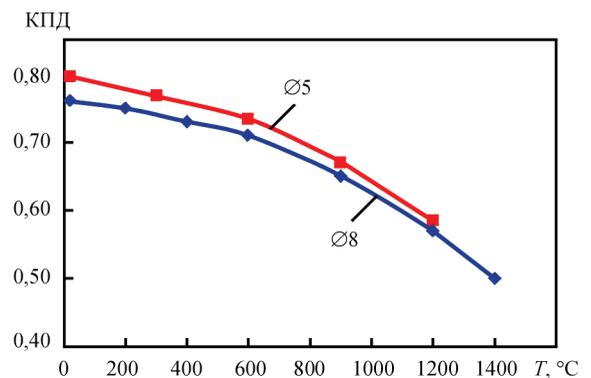


Рис. 10. Зависимость термического КПД нагрева контактов диаметром 5 и 8 мм от температуры приконтактного слоя металла, примыкающего к поверхности оплавления

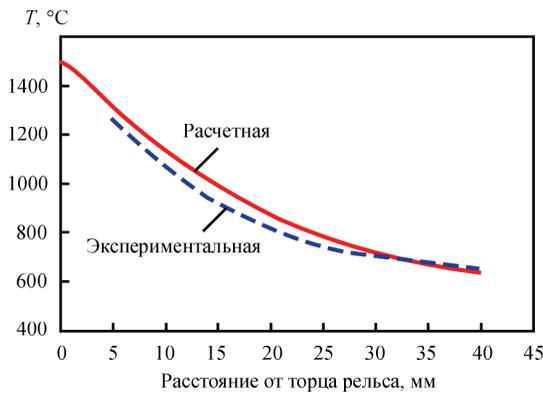


Рис. 11. Распределение температуры вдоль оси железнодорожного рельса при непрерывном оплавлении

рельсов непрерывным оплавлением на стационарной рельсосварочной машине К1000, также при сварке данного стыка проводился замер температурного поля с помощью термопар.

Как видно из рис. 11, разработанная модель позволяет с достаточно высокой точностью прогнозировать кинетику температурного поля в рассматриваемом случае, что позволяет ее использование в дальнейшем для выбора оптимальных температурных режимов без проведения дорогостоящих экспериментов. В частности, на основе (6) был проведен расчет КПД для непрерывного оплавления рельсов. Как показывают результаты численного прогнозирования (рис. 12), в начальный период КПД сварки достаточно высокий, но в процессе оплавления он снижается.

Это обусловлено тем, что температура торцов оплаиваемых поверхностей повышается, и термический КПД изменяется так, как и в случае нагрева ЕК (см. рис.10). Использование данной модели позволяет значительно расширить диапазон поиска путей интенсификации нагрева при многофакторном управлении параметрами сварки, влияющими на формирование температурного поля, а также облегчить поиск оптимальных термических циклов при контактной стыковой сварке непрерывным оплавлением толстостенных изделий.

Выводы

1. Анализ записей регистрации параметров сварки и поверхностей оплавления рельсов показал, что при непрерывном оплавлении толстостенных деталей могут возникать контакты различных диаметров, но максимальная их площадь не превышает площадь, соответствующую контактам диаметром 5 и 8 мм.

2. Длительность нагрева контактов различной площади непрерывным оплавлением зависит от значения плотности тока, протекающего через контакт.

3. В диапазоне плотностей тока 100...400 А/мм² проявляется заметная зависимость времени нагрева контактов от значения плотности тока.

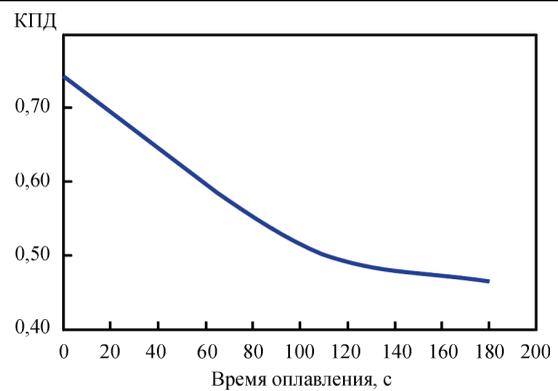


Рис. 12. Изменение термического КПД в процессе непрерывного оплавления железнодорожных рельсов

4. С увеличением температуры поверхности контакта длительность его нагрева значительно уменьшается.

5. Определены общие зависимости термического КПД при непрерывном оплавлении от плотности тока, проходящего через контакт, и температуры в зоне контакта. Установлено, что с увеличением плотности тока и температуры контакта термический КПД снижается.

Расчетным путем определено температурное поле при сварке непрерывным оплавлением железнодорожных рельсов типа Р65 на оптимальном режиме. Результат расчета близок к экспериментальному.

Список литературы

- ГОСТ Р ИСО 15614-13-2009. (2011) *Технические требования и аттестация процедур сварки металлических материалов. Проверка процедуры сварки. Часть 13. Контактная стыковая сварка сопротивлением и оплавлением*. Москва, Стандартиформ.
- TU U 27.1-40081293-002:2016. *Рейки нові зварені для залізниць*. «Дніпропетровське НКTB КГ» філії «НДКТІ» ПАТ «Укрзалізниця».
- Кучук-Яценко С. И. (1992) *Контактная стыковая сварка непрерывным оплавлением*. Киев, Наукова думка.
- Leonhard Weingrill, Norbert Enzinger. (2017) Temperature fields evolution during flash-butt welding of railway rails. *Materials Science Forum*, № , 2088–2093.
- Орлов Б. Д., Чакалев А. А., Дмитриев Ю. В. (1986) *Технология и оборудование контактной сварки*. Москва, Машиностроение.
- Кучук-Яценко С. И. (1976) *Контактная стыковая сварка оплавлением*. Киев, Наукова думка.
- Yan Guo Li, Fu Cheng Zang. (2010) Numerical simulation of flash-butt welding of high manganese steel crossing with carbon steel rail. *Advanced materials research*, 123-125, 571–574.
- (2005) *Processes and mechanisms of welding residual stress and distortion*. Ed. by Zhili Feng. Sawston, Woodhead Publishing.

References

- (2011) GOST R ISO 15614-13-2009: Specification and qualification of welding procedures for metallic materials. Welding procedure test. Pt. 13: *Resistance butt and flash welding*. Moscow, Standartinform [in Russian].
- TU U 27.1-40081293-002:2016: *New welded rails for railways*. Dnipropetrovske NKTB, NDKTI PJSC Ukrzaliznytsya [in Ukrainian].

3. Kuchuk-Yatsenko, S.I. (1992) *Continuous flash-butt welding*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
4. Weingrill, L., Enzinger, N. (2017) Temperature fields evolution during flash-butt welding of railway rails. *Mater. Sci. Forum*, **8**, 2088-2093.
5. Orlov, B.D., Chakalev, A.A., Dmitriev, Yu.V. (1986) *Technology and equipment for resistance welding*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
6. Kuchuk-Yatsenko, S.I. (1976) *Flash-butt welding*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
7. Yan Guo Li, Fu Cheng Zang (2010) Numerical simulation of flash-butt welding of high-manganese steel crossing with carbon steel rail. *Adv. Mater. Research*, 123-125, 571-574.
8. (2005) *Processes and mechanisms of welding residual stress and distortion*. Ed. by Zhili Feng. Sawston, Woodhead Publishing.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ НАГРІВАННЯ МЕТАЛУ ПРИ КОНТАКТНОМУ СТИКОВОМУ ЗВАРЮВАННІ БЕЗПЕРЕРВНИМ ОПЛАВЛЕННЯМ

С. І. КУЧУК-ЯЦЕНКО, О. С. МІЛЕНІН, О. А. ВЕЛИКОІВАНЕНКО, Є. В. АНТИПІН, О. В. ДІДКОВСЬКИЙ

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В останнє десятиріччя актуальним та практично значущим завданням є одержання високоякісних з'єднань із високоміцних сталей та сплавів. Для його рішення потрібні технології, які відрізняються висококонцентрованим нагріванням при мінімальному енерговкладенні, у тому числі й при контактному стиковому зварюванні залізничних рейок безперервним оплавленням. Для рішення даного завдання була розроблена математична модель процесу нагрівання металу при контактному стиковому зварюванні безперервним оплавленням. Модель дозволить уникнути проведення трудомістких експериментів, що дорого коштують, і значно розширити діапазон пошуку шляхів оптимізації при багатofакторному керуванні параметрами зварювання, що впливають, зокрема, на формування температурного поля при контактному стиковому зварюванні залізничних рейок безперервним оплавленням. Бібліогр. 8, рис. 12.

Ключові слова: безперервне оплавлення, одиничний контакт, математичне моделювання, контактне стикове зварювання, густина струму, коефіцієнт корисної дії, глибина кратера, іскровий зазор, залізнична рейка

MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF HEATING METAL IN FLASH-BUTT WELDING

S.I. KUCHUK-YATSENKO, A.S. MILENIN, E.A. VELIKOIVANENKO, E.V. ANTIPIN, A.V. DIDKOVSKY

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11, Kazimir Malevich str., 03150, Kiev, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

In the last decade, an urgent and practically significant problem has been producing of high-quality joints of high-strength steels and alloys. For its solution the technologies are required which are distinguished by a high-concentration heating at a minimum energy input, including flash-butt welding of rails. To solve this problem, a mathematical model of the process of heating metal in flash-butt welding was developed. The model allows avoiding labor-consuming and expensive experiments and significantly expanding the range of searching the ways of optimizing at a multifactor control of welding parameters, affecting, in particular, the formation of the temperature field in flash-butt welding of rails. 8 Ref., 12 Fig.

Keywords: continuous flashing, single contact, mathematical modeling, flash-butt welding, current density, efficiency coefficient, crater depth, spark gap, rail

Поступила в редакцию 28.09.2018

Новая книга

Физические процессы при сварке и обработке материалов. Теоретическое исследование, математическое моделирование, вычислительный эксперимент: Сб. статей и докладов под ред. акад. НАН Украины И.В. Кривцуна. — Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2018. — 642 с.

Сборник включает 86 статей и докладов сотрудников отдела физики газового разряда и техники плазмы Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, опубликованных за период 1978–2018 гг. В нем обобщен сорокалетний опыт научно-исследовательской деятельности отдела в области теоретического исследования и компьютерного моделирования физических явлений, протекающих при дуговых, плазменных, лазерных и гибридных процессах сварки, наплавки и напыления покрытий. Может быть интересен и полезен ученым, инженерам и технологам, занимающимся проблемами дуговой, плазменной, лазерной и гибридной сварки и обработки материалов, а также аспирантам и студентам, изучающим теоретические основы сварочных и родственных процессов.

Сборник можно заказать в редакции журнала «Автоматическая сварка».

