

УДК 621.791

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА И ЕГО ВЛИЯНИЯ НА ЭЛЕКТРОННЫЙ ПУЧОК В ПРОЦЕССЕ СВАРКИ РАЗНОРОДНЫХ СТАЛЕЙ

А. Л. ГОНЧАРОВ, В. К. ДРАГУНОВ, А. П. СЛИВА, И. С. ЧУЛКОВ

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Москва, Россия

UDC 621.791

THERMOELECTRIC EFFECT AND ITS INFLUENCE ON THE ELECTRON BEAM DURING WELDING OF DISSIMILAR STEELS INVESTIGATION

A. L. GONCHAROV, V. K. DRAGUNOV, A. P. SLIVA, I. S. CHULKOV

Аннотация. Приведены результаты исследований магнитных и термоэлектрических свойств трех марок конструкционных сталей различных структурных классов. Получены экспериментальные и расчетные данные изменения магнитной индукции в процессе электронно-лучевой сварки разнородных сталей. Рассчитана форма отклоненного электронного пучка в магнитном поле термоэлектрических токов. Рассчитанные значения отклонений сравниваются с экспериментальными результатами.

Ключевые слова: разнородные стали, электронно-лучевая сварка, магнитные поля, термоэлектрический эффект, электронный пучок.

Abstract. The results of the magnetic and thermoelectric properties studies for three grades of structural steels of various structural classes are presented. Experimental and calculated data on magnetic induction changes during electron-beam welding of dissimilar steels are obtained. The shape of the deflected electron beam in the magnetic field of thermoelectric currents is calculated. The calculated values of the deviations are compared with the experimental results.

Keywords: dissimilar steels, electron beam welding, magnetic fields, thermoelectric effect, electron beam.

Введение. Процесс электронно-лучевой сварки характеризуется большим числом физических явлений, происходящих при взаимодействии ускоренного электронного пучка с материалом, а именно тепловых, деформационных, гидродинамических и плазменных. Большинство из этих процессов связаны между собой, более того, возникающие физические поля в ответ влияют на инструмент обработки – электронный пучок.

В процессе сварки разнородных материалов наибольшее влияние на электронный пучок оказывают магнитные поля, образующиеся в результате термоэлектрических токов [1, 2]. Таким образом, существующее многообразие физических процессов может быть дополнено термоэлектрическими явлениями, которые при определенных условиях становятся решающими в формировании качественного сварного соединения. Отклонение луча, вызванное магнитным полем термоэлектрических токов, может приводить к дефекту в виде непровара по глубине стыка.

Значение магнитной индукции термоэлектрического тока определяется рядом факторов, включая распределение температуры в зоне сварки, размеры свариваемой детали, а также электрическое сопротивление, магнитную проницаемость и термоЭДС соединяемых материалов.

Разработан ряд математические модели термоэлектрических явлений в электронно-лучевой сварке для прогнозирования отклонения электронного пучка от стыка [1, 2]. Однако допущения, сделанные в существующих моделях, вызывают значительные ограничения в их применимости, а сами модели недостаточно проверены. Отсутствуют данные о значениях термоэлектрических и магнитных свойств для большинства марок конструкционных материалов.

Цель работы заключалась в изучении распределения магнитного поля токов термоЭДС при электронно-лучевой сварке и его связи с отклонением электронного пучка при сварке разнородных сталей.

Методы исследования. С помощью термопар получены температурные зависимости термоЭДС для различных сталей трех структурных классов. Температурную зависимость термоЭДС определяли интегральным методом на термопарах из исследуемых материалов, в которых одна из ветвей изготавливалась из хромеля (табл. 1). Температурный градиент обеспечивали путем помещения исследуемой термопары в высокотемпературную печь.

Табл. 1. Химический состав исследуемых сталей

Материал	Химический состав, %					Класс	Термо- ЭДС при 800 °С
	С	Cr	Ni	Mo/V	Mn/Si		
12Х18Н10Т	< 0,12	17...19	9...11	–	< 2 / < 0,8	А	–2,18
20Х13	0,16...0,25	12...14	< 0,6	–	< 0,6 / < 0,7	М + Ф	7,71
09Г2С	< 0,12	< 0,3	< 0,2	– / < 0,12	1,3...1,7 / 0,5...0,8	П	–0,25

ТермоЭДС измеряли вольтметром В7-22 при нагревании горячего спая в диапазоне температур 50 °С...1100 °С. Далее относительный коэффициент термоЭДС для пар проводников вычисляли из выражения

$$S_r = \frac{dE_r}{dT}, \quad (1)$$

где E_r – измеренная относительная термоЭДС.

Затем был рассчитан абсолютный коэффициент термоЭДС:

$$S_{abs} = S_r - S_{chr}, \quad (2)$$

где S_{chr} – коэффициент термоЭДС для хромеля.

Для получения кривых намагниченности использовали комбинированный прибор Remagraph-Remagraph, состоящий из двух флюксометров EF5. Для получения кривой намагничивания для каждого исследуемого материала было изготовлено по три образца сечением 10 × 10 мм (±0,02 мм); длина образца составляла 120 мм. Перед измерениями каждый из образцов размагничивали в переменном магнитном поле с уменьшающейся амплитудой. Затем для каждого

из образцов была получена кривая намагниченности. Электронно-лучевая сварка характеризуется малыми значениями индукции магнитного поля, индуцированной термоэлектрическим током, поэтому для дальнейшего анализа она была ограничена значением 100 мТл.

На основе полученных данных о термоэлектрических и магнитных свойствах создана улучшенная численная модель термоэлектрических явлений при ЭЛС разнородных материалов.

Модель состоит из четырех подмоделей: тепловая задача, электрическая задача, магнитная задача и траекторная задача. Тепловая задача решена на основе нестационарного теплового уравнения

$$c(T)\rho(T)\vec{V} \cdot \nabla T = \nabla(\lambda(T)\nabla T) + Q(x, y, z), \quad (3)$$

где $c(T)$ – удельная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг·К); $\rho(T)$ – плотность материала, кг/м³; $\lambda(T)$ – теплопроводность материала, Вт/(м·К); $Q(x, y, z)$ – объемный источник тепла, Вт/м³.

Источником тепла при ЭЛС является парогазовый канал, который в модели был описан в форме цилиндра. Тогда действие объемного источника может быть задано как граничное условие на цилиндрической границе парогазового канала с радиусом r_k в виде удельного теплового потока $q_b(x, y, z)$.

Полученное распределение температуры при сварке было использовано для решения электрической задачи, которая была сформулирована как закон Ома в дифференциальной форме.

$$\vec{j} = \sigma\vec{E} + \vec{j}_e, \quad (4)$$

где $\vec{j}_e = -\sigma S \nabla T$; \vec{j} – вектор плотности термоэлектрического тока; \vec{E} – вектор напряженности электрического поля; σ – проводимость материала, С/м; S – термоэлектрический коэффициент, В/К.

Магнитную задачу решали нахождением векторного потенциала \vec{A} с последующим вычислением индукции магнитного поля токов термоЭДС \vec{B} :

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\mu(T)\mu_0} \nabla \cdot \vec{A} \right) = \vec{j}; \quad (5)$$

$$\vec{B} = \nabla \cdot \vec{A}. \quad (6)$$

В расчетах учитывалось формирование парамагнитной зоны в области канала проплавления. Для этого была задана зависимость магнитной проницаемости в виде

$$\mu(T) = \mu_m(1 - h(T - T_c)), \quad (7)$$

где μ_m – магнитная проницаемость материала при комнатной температуре; T_c – температура Кюри; $h(x)$ – функция Хевисайда.

И, наконец, для полученного распределения магнитной индукции была решена траекторная задача движения заряженной частицы (электрона) в стационарном магнитном поле:

$$\frac{d^2x}{dz^2} + \sqrt{\frac{2e}{mU}} B_z(x, y, z) \frac{dy}{dz} = \sqrt{\frac{2e}{mU}} B_y(x, y, z); \quad (8)$$

$$\frac{d^2y}{dz^2} - \sqrt{\frac{2e}{mU}} B_z(x, y, z) \frac{dx}{dz} = -\sqrt{\frac{2e}{mU}} B_x(x, y, z), \quad (9)$$

где $x(z)$, $y(z)$ – траектории электронов в плоскостях XOZ и YOZ соответственно; $B_x(x, y, z)$, $B_y(x, y, z)$, $B_z(x, y, z)$ – проекции вектора магнитной индукции на соответствующие координатные оси; U – ускоряющее напряжение в электронной пушке.

Из-за сложности разрабатываемых численных моделей их проверка должна осуществляться по нескольким параметрам. Помимо оценки траектории электронного пучка, перспективной и осуществимой является оценка индукции магнитного поля. На рис. 1 показана схема измерения магнитного поля в сварных образцах.

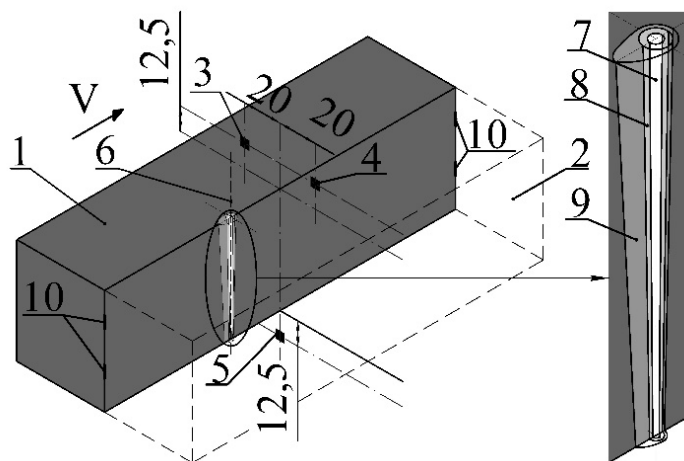


Рис. 1. Схема измерения индукции магнитного поля при ЭЛС разнородных материалов: 1, 2 – свариваемые образцы; 3, 4 – датчики магнитной индукции над поверхностью образцов; 5 – датчик магнитной индукции в корне сварного шва; 6 – ось электронного пучка; 7 – электронный пучок в канале проплавления; 8 – парогазовый канал; 9 – сварочная ванна; 10 – прихваточные сварные швы

Результаты исследований. На рис. 2 показаны экспериментальные значения термоэлектрических (см. рис. 2, а) и магнитных (см. рис. 2, б) свойств исследуемых сталей, определенные в ходе эксперимента.

Индукция магнитного поля, измеренная в процессе ЭЛС для образца из сталей 12X18Н10Т + 20X13, показана на рис. 3. Максимальное значение

индукции магнитного поля достигает значения 0,89 мТл в корне сварного шва (датчик поз. 5 на рис. 3) и значения 0,77 мТл над образцом из 20Х13 (датчик поз. 3 на рис. 3). Отклонение электронного пучка происходит в сторону стали 20Х13, увеличиваясь с 1,8 мм в начале сварного шва, достигая 3,8 мм в его середине и уменьшаясь до 1,6 мм в конце сварного шва (рис. 4). Расчетные значения индукции в корне шва и над поверхностью стали 20Х13 составляют 0,98 и 0,83 мТл соответственно.

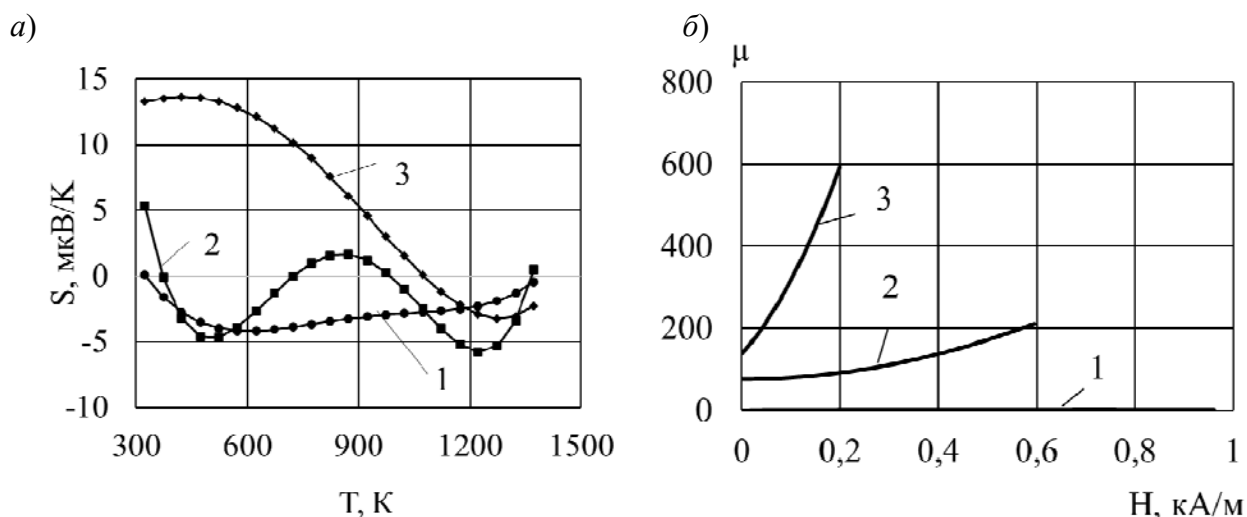


Рис. 2. Экспериментальные зависимости абсолютного коэффициента термоЭДС (а) от температуры и магнитной проницаемости (б) от напряженности магнитного поля

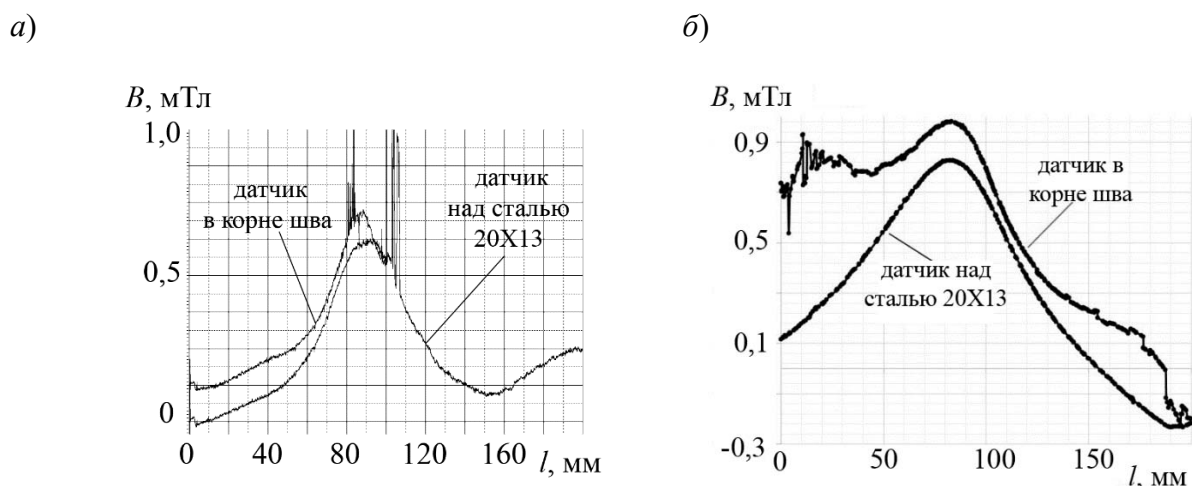


Рис. 3. Экспериментальные (а) и численные (б) значения индукции магнитного поля термоэлектрических токов при ЭЛС сталей 12Х18Н10Т и 20Х13

Во время ЭЛС образцов из сталей 20Х13 и 09Г2С максимальные значения индукции магнитного поля составили 0,54 и 0,47 мТл над сталью 20Х13 и 09Г2С соответственно. Измерения в корне шва не проводились. Отклонение электронного пучка в корне сварного шва (см. рис. 4) также изменяется неравномерно по длине сварного шва с 2,1 мм в начале и конце сварного шва и достигает максимума в 2,8 мм в его середине. В математической модели индукция

магнитного поля над образцом из стали 09Г2С и стали 20Х13 рассчитана на уровне 0,51 и 0,58 мТл соответственно.

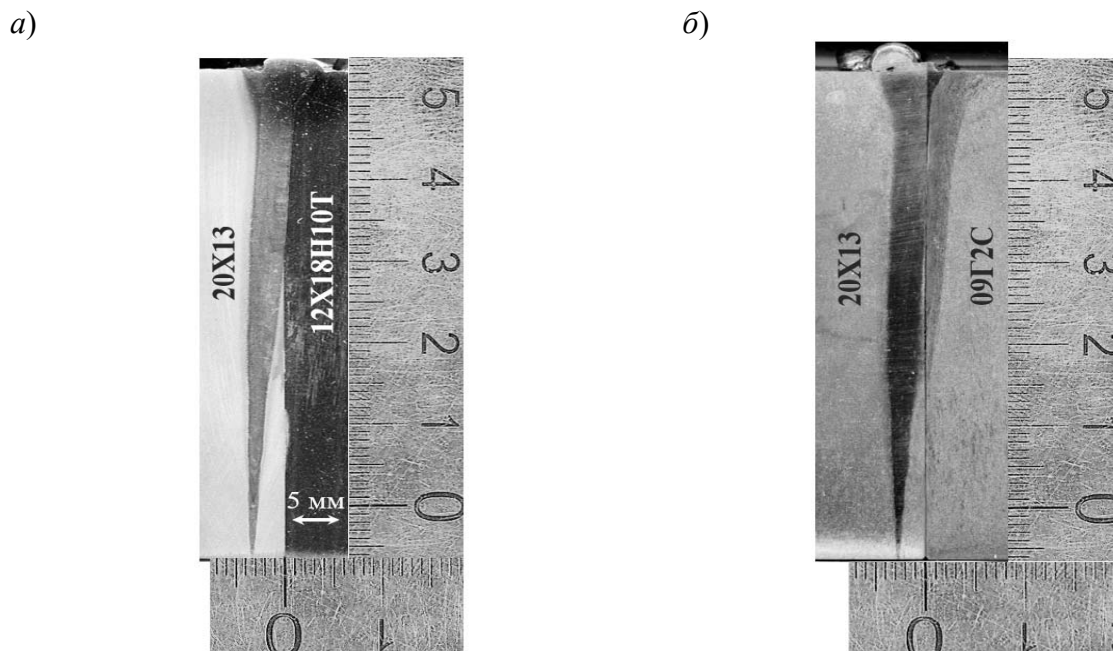


Рис. 4. Макрошлифы сварных соединений разнородных сталей 12Х18Н10Т + 20Х13 (а) и 09Г2С + 20Х13 (б) толщиной 60 мм, полученные ЭЛС

Выводы. Индукция магнитного поля в численной и физической моделях показывает хорошее совпадение, кроме того, совпадение показывают полученные значения отклонения электронного пучка. Таким образом, применяемая численная модель была верифицирована в двух подмоделях – магнитной и траекторной. Отклонение электронного пучка при сварке пары сталей 12Х18Н10Т + 20Х13 оказалось больше в сравнении с отклонением при сварке 09Г2С + 20Х13, что объясняется большей разницей в значениях термоЭДС для первой пары сталей и подтверждается большими зафиксированными значениями индукции магнитного поля в эксперименте.

Работы выполнены в ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSWF – 2020-0023).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Wei, P. S.** Electron beam deflection when welding dissimilar metals / P. S. Wei, T. W. Lii // Journal of Heat Transfer. – 1990. – № 112 (3). – P. 714–720.
2. **Драгунов, В. К.** Пространственные параметры электронного пучка при взаимодействии с намагниченной мишенью / В. К. Драгунов, А. Л. Гончаров, А. П. Слива // Сварочное производство. – 2008. – № 12. – С. 20–24.

E-mail: GoncharovAL@mpei.ru.