



ОЦЕНКА ФОРМЫ И РАЗМЕРОВ СВАРОЧНОЙ ВАННЫ ПРИ НАПЛАВКЕ КОМБИНИРОВАННЫМ ЛЕНТОЧНЫМ ЭЛЕКТРОДОМ

В.Н. МАТВИЕНКО, В.А. МАЗУР, Л.К. ЛЕЩИНСКИЙ

ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет». 87500 Украина, г. Мариуполь, ул. Университетская, 7.
E-mail: matviyenkovn@mail.ru

Представлены результаты расчетной оценки формы и размеров сварочной ванны при наплавке комбинированным ленточным электродом под флюсом. Использовалась математическая модель, основанная на решении нелинейного дифференциального уравнения теплопроводности с учетом зависимости от температуры теплофизических свойств основного металла. Расчетные зависимости, описывающие процесс распространения тепла в основном металле при наплавке комбинированным ленточным электродом, получены из условий аддитивного действия трех источников — средней и двух боковых лент. С увеличением тепловложения на краях изменяется не только форма и размеры ванны, но также возрастает неравномерность проплавления. Показано, что за счет изменения угла поворота боковых лент относительно средней ленты комбинированного электрода можно воздействовать на формообразование сварочной ванны и глубину проплавления. Адекватность разработанной модели подтверждена хорошим совпадением расчетных данных с экспериментом. Библиогр. 10, рис. 9.

Ключевые слова: распространение тепла, расчет температуры нагрева, форма сварочной ванны, математическая модель, наплавка под флюсом, комбинированный ленточный электрод, угол поворота боковых лент, тепловложение на краях ванны, неравномерность проплавления.

Процесс широкослойной наплавки ленточным электродом отличается меньшим проплавлением изделия и снижением доли участия материала изделия в наплавляемом слое [1]. Характерный для этого процесса рассредоточенный ввод тепла по фронту плавления основного металла [2], а также увеличенный теплоотвод на краях сварочной ванны способствуют образованию дефектов — краевых непроваров, подрезов, шлаковых включений (рис. 1). На их возникновение большое влияние оказывает отток расплавленного металла от боковых границ сварочной ванны с формированием осевого потока, направленного в хвостовую часть ванны. Это подтверждается значительной выпуклостью средней части задней стенки кратера, образуемого при наплавке ленточным электродом (рис. 2).

Для устранения краевых дефектов необходимо перераспределить тепломассоперенос по ширине ванны, изменить направление потоков жидкого

металла, улучшив заполнение жидким металлом боковых участков ванны. С целью достижения таких изменений используется воздействие на расплав ванны магнитного поля [3], в результате чего образуются потоки, направленные от середины к краям ванны и далее вдоль краев в хвостовую часть. При этом изменяется форма сварочной ванны, а на задней стенке кратера образуются две выпуклости. Аналогичное влияние на форму ванны оказывает применение профилированного по всей ширине ленточного электрода, позволяющего улучшить качество формирования валика, снизить вероятность появления краевых дефектов [4]. Намного большими возможностями влияния на образование сварочной ванны и условия формирования широкого валика отличается процесс наплавки комбинированным ленточным электродом, применение которого обеспечивает строго ограниченное равномерное проплавление основного металла, отсутствие дефектов в зоне сплавления [5].



Рис. 1. Дефекты формирования валика при наплавке ленточным электродом: *a* — подрез; *б* — краевой непровар и шлаковое включение



Рис. 2. Форма сварочной ванны при наплавке ленточным электродом 50×0,5 мм

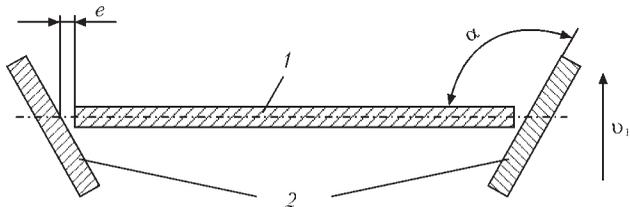


Рис. 3. Конструкция комбинированного ленточного электрода: 1 — средняя лента; 2 — боковые ленты

Конструкция комбинированного ленточного электрода (рис. 3) характеризуется размерами средней и боковых лент, скоростью подачи каждой ленты, углом поворота α боковых лент относительно средней, зазором e между лентами. От этих характеристик комбинированного электрода зависят условия плавления основного металла, формообразование сварочной ванны, неравномерность проплавления. Экспериментальное изучение этих процессов достаточно затруднено. В то же время численное моделирование процесса распространения тепла при сварке плавлением (наплавке) позволяет не только снизить трудоемкость проводимых исследований, но получить новые данные, прогнозировать форму и размеры ванны, состав, структуру и свойства металла шва (наплавленного слоя) [6, 7]. Поэтому в настоящей работе для исследования формы и размеров сварочной ванны при наплавке комбинированным ленточным электродом применялся метод математического моделирования в сочетании с проведением экспериментов.

Математическое моделирование процесса нагрева и плавления основного металла. Распространение тепла при наплавке ленточным электродом под флюсом описывается уравнением предельного состояния процесса нагрева полубесконечного тела линейным источником конечной ширины. Расчетные значения размеров зоны проплавления, полученные при решении линейного дифференциального уравнения теплопроводности для теплопроводящего твердого тела с независи-

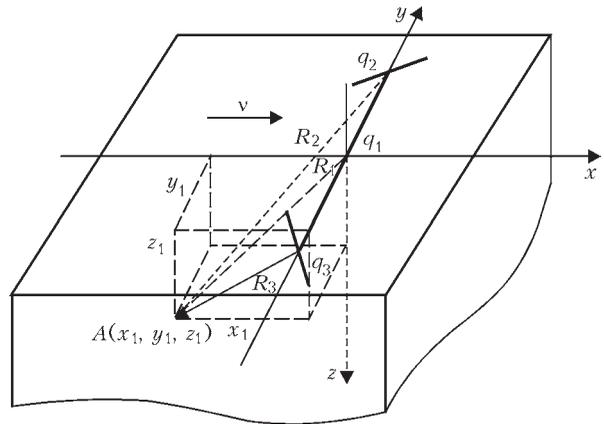


Рис. 4. Расчетная схема нагрева тела тремя лентами комбинированного электрода

щими от температуры теплофизическими свойствами, значительно расходятся с экспериментом [2, 8]. Точность расчетов значительно повышается, если учитывается зависимость теплофизических свойств металла от температуры, что требует решения нелинейного трехмерного дифференциального уравнения теплопроводности. Численное решение уравнения с использованием метода конечных элементов положено в основу разработанной математической модели [9]. При этом учитывалось, что до наплавки температура всех точек тела одинакова и равна температуре окружающей среды, во время наплавки мощность теплового источника полностью расходуется на нагрев тела, а тепловой поток на его границах равен нулю. Применение при моделировании программного обеспечения MSC.Patran-Nastran позволило не только получать текущие значения температуры, но также количественные характеристики теплового поля в зоне нагрева и плавления основного металла.

Нагрев основного металла линейным источником тепла [2] в процессе наплавки комбинированным ленточным электродом определяется суммарным действием трех источников — среднего q_1 и двух боковых q_2 и q_3 (рис. 4). Температура нагрева металла от воздействия каждой из лент комбинированного электрода рассчитывается из зависимости для источника тепла постоянной мощности, движущегося по поверхности полубесконечного тела:

$$T_i(x, y, z) - T_0 = \frac{q}{2\pi B(b)} \int_0^{y_i} \left(\frac{1}{R_i} \right)^{\frac{v}{2a}} (x_i - R_i)$$

где $R_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}$.

Расчеты при моделировании и эксперименты проводили для процесса наплавки на пластины из стали Ст3 толщиной 40 мм комбинированным электродом из лент Св-07Х25Н13 (средняя лента 75×0,5 мм, боковые ленты 25×0,7 мм), угол пово-



рота боковых лент к средней $\alpha = 90^\circ \dots 150^\circ$, зазор между лентами $e = 0^{+5}$ мм. Параметры режима наплавки под флюсом ОФ-10: $I_n = 1300 \dots 1350$ А; $U_n = 30 \dots 32$ В; $v_n = 14$ м/ч.

Моделирование теплового поля наплавляемого изделия. Для оценки формы и размеров сварочной ванны исследовали модели теплового поля и положения изотермы $T_{пл}$ в плоскости, параллельной наплавляемой поверхности тела (рис. 5, 6). При этом учитывалось, что плавление металла и образование ванны во многом зависит от угла поворота боковых лент относительно средней ленты комбинированного электрода. По данным предварительных экспериментов уменьшение угла поворота $\alpha < 90^\circ$ приводит к ухудшению качества формирования наплавленного валика и возрастанию неравномерности проплавления. Поэтому в данной работе рассматривали результаты компьютерного моделирования теплового поля для значений угла поворота $\alpha > 90^\circ$. С увеличением угла α от 90° до 150° (рис. 6) изменяется степень рассредоточенности вводимого тепла и переноса электродного металла в сварочную ванну. Это влияет на положение границы изотермы $T_{пл}$, полученной при моделировании, позволяя оценить не только изменение формы ванны, но также длины участков $B_{пл}$ изотермы плавления, ориентированных вдоль продольной оси ванны. От этого зависит заполнение и время существования расплава на краю ванны. Кроме того, от геометрии комбинированного электрода зависит угол ψ , характеризующий отклонение изотермы $T_{пл}$ от участков, ориентированных вдоль продольной оси ванны, и определяющий уменьшение ширины хвостовой части ванны относительно ширины фронта плавления (рис. 6). Адекватность результатов моделирования формы и размеров сварочной ванны подтверждается экспериментальными данными (рис. 7).

Рассматриваемое на модели влияние геометрии комбинированного ленточного электрода на форму и размеры сварочной ванны, позволяющее улучшить формирование валика, сочеталось с необходимостью обеспечить надежное равномерное проплавление основного металла. Исходя из этого, выбор при моделировании оптимальных значений угла поворота боковых лент комбинированного электрода осуществлялся с учетом ограничения глубины проплавления на краях. Максимум сосредоточенности тепломассопереноса на краях ванны возникает, когда угол поворота боковых лент $\alpha = 90^\circ$, что сопровождается увеличением глубины проплавления в этих зонах (рис. 8, в).

Как видно из положения границы изотермы $T_{пл}$, основную часть площади проплавления составляют участки, удаленные от середины ванны. С увеличением угла α до 150° рассредоточенность

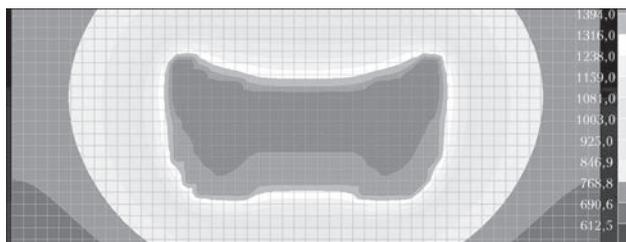


Рис. 5. Модель теплового поля наплавляемой поверхности тела для угла наклона боковых лент $\alpha = 120^\circ$

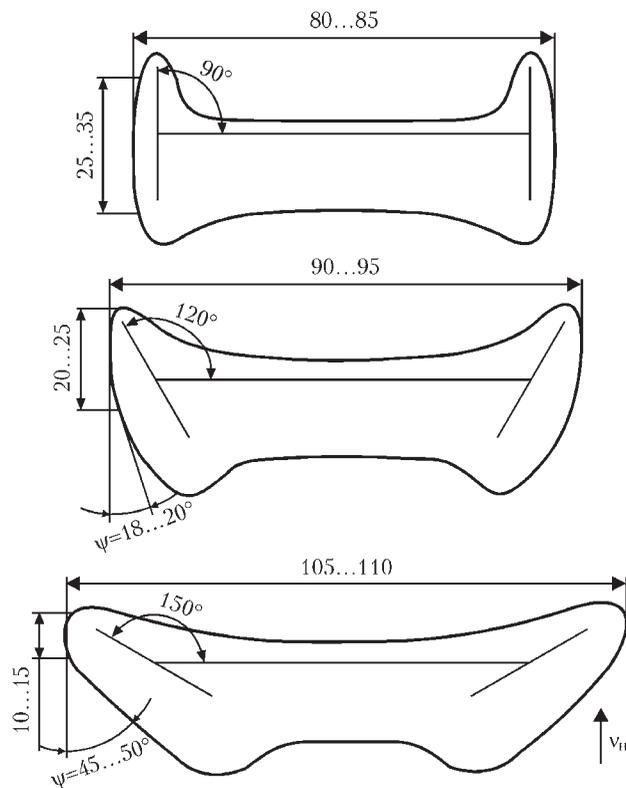


Рис. 6. Моделирование формы и размеров сварочной ванны (границ изотермы $T_{пл}$)

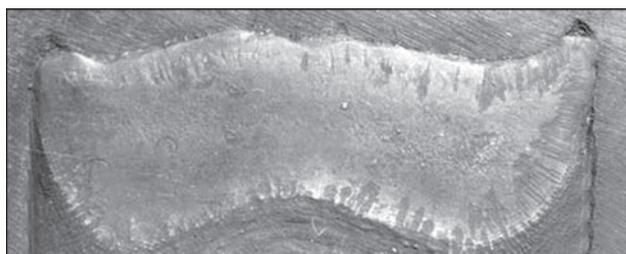


Рис. 7. Форма сварочной ванны при наплавке комбинированным ленточным электродом (угол $\alpha = 120^\circ$)

теплового потока приводит к значительному увеличению ширины ванны, неравномерность проплавления снижается (рис. 9, з). Оптимальное сочетание высокого качества формирования валика и равномерности проплавления достигается, когда $\alpha = 120^\circ$, что выявлено при моделировании теплового поля и границы изотермы $T_{пл}$ (рис. 8, а, б), а также подтверждается макроструктурой поперечного сечения наплавленного валика (рис. 9).

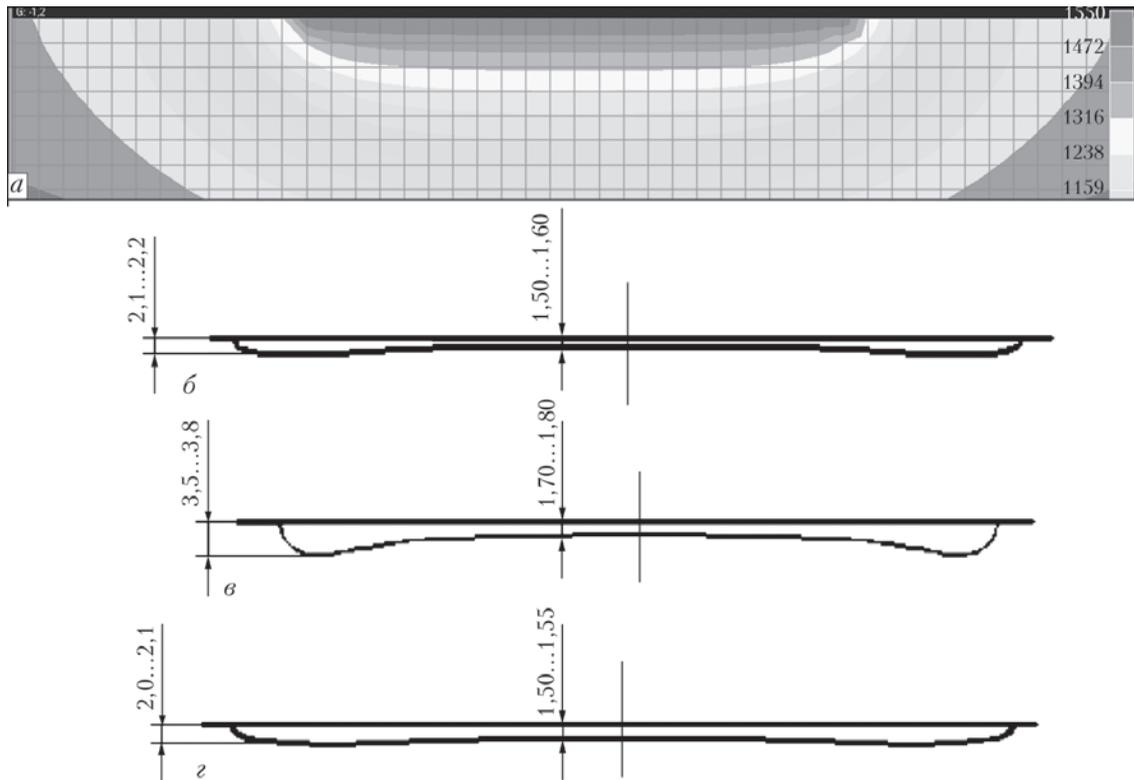


Рис. 8. Модель теплового поля (а) и границы изотермы $T_{пл}$ (б–г) в плоскости, перпендикулярной наплавляемой поверхности: $\alpha = 120^\circ$ (а, б); 90° (в); 150° (г)

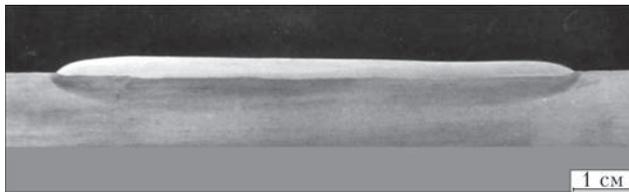


Рис. 9. Макрошлиф поперечного сечения наплавленного валика ($\alpha = 120^\circ$)

В заключение можно отметить, что точность расчетных значений температуры нагрева основного металла и расположения границы изотермы плавления, определяющей форму и размеры сварочной ванны при наплавке комбинированным ленточным электродом [10], значительно возрастет в случае использования в расчете зависящих от температуры теплофизических характеристик металла. Это подтверждается соответствием данных, полученных при математическом моделировании, результатам эксперимента.

1. Рябцев И.А. Высокопроизводительная широкоослойная наплавка электродными проволоками и лентами // Автомат. сварка. – 2005. – № 6. – С. 36–41.

2. Махненко В.И., Кравцов Т.Г. Тепловые процессы при механизированной наплавке деталей типа круговых цилиндров. – Киев: Наук. думка, 1976. – 159 с.

3. Pat. 4309587, B23K 9/04 USA. Horizontal electro-slag welding process for surfacing / S. Nakano, T. Chiba, N. Ichihara, K. Agusa et al. – 1982.

4. Лецинский Л.К., Матвиенко В.Н., Лаврик В.П. Влияние формы электродной ленты на качество наплавленного слоя стали // Автомат. сварка. – 1985. – № 9. – С. 60–62.

5. А.с. 1561348 СССР, МКИ B23K 9/04. Способ наплавки расщепленным ленточным электродом / В.Н. Матвиенко, Л.К. Лецинский, В.А. Егоров и др. – Заявл. 28.09.88; Опубл. 03.01.90, Бюл. № 16.

6. ASM Handbook. Welding Fundamentals and Processes. – ASM International, 2011. – Vol. 6A. – 700 p.

7. Моделирование тепловых процессов для улучшения структуры металлов и сплавов методом трения с перемешиванием / А.Л. Майстренко, В.М. Нестеренков, В.А. Дутка, В.А. Лукаш и др. // Автомат. сварка. – 2015. – № 1. – С. 5–14.

8. Белоусов Ю.В., Лецинский Л.К., Сологуб Б.Б. Выбор оптимальной формы ленточного электрода для широкоослойной наплавки // Там же. – 1976. – № 12. – С. 24–28.

9. Математическое описание процесса распространения тепла в инструменте сложной формы от действия плазменного источника нагрева / С.С. Самотугин, О.Ю. Нестеров, В.А. Мазур, В.В. Ананьева // Вест. Инженерной акад. наук Украины, 2004. – С. 101–107.

10. Матвиенко В.Н., Лецинский Л.К., Мазур В.А. Нагрев и плавление основного металла при наплавке составным ленточным электродом под флюсом // Свароч. пр-во. – 2014. – № 4. – С. 3–7.

Поступила в редакцию 22.06.2015