

К ВЫБОРУ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМОВ НАПЛАВКИ ПОД ФЛЮСОМ ПОРОШКОВЫМИ СПЕЧЕННЫМИ ЛЕНТАМИ

Показано, что при дуговой наплавке под флюсом спеченной электродной лентой невозможно использовать уравнение Юнга при описании формы и размеров валика. Поставленную задачу удалось решить при использовании методов безразмерных критериев подобия и теории размерностей на основе аппроксимационных формул.

Ключевые слова: дуговая наплавка, порошковые спеченные ленты, геометрические параметры валика, оптимальные параметры режима наплавки.

Муратов В.О. *До вибору оптимальних параметрів режимів наплавлення під флюсом порошковими спеченими стрічками. Показано, що при дуговому наплавленні під флюсом спеченою електродною стрічкою неможливо використовувати рівняння Юнга під час описання форми і розмірів валика. Поставлену задачу вдалося вирішити при використанні методів безрозмірних критеріїв подібності і теорії розмірностей на основі формул апроксимацій.*

Ключові слова: дугове наплавлення, порошкові спечені стрічки, геометричні параметри валика, оптимальні параметри режиму наплавлення.

Muratov V.A. *On the choice of parameters of submerged the powder sintered strips. It was shown that during submerged deposition with powder sintered strip it is impossible to use Young's equation for description of bead's size and shape. This problem was solved by means of the methods of dimensionless criteria of similarity and theory of dimensions, based upon approximation formulae.*

Keywords: arc surfacing, powder-like sintered strips, geometrical parameters bead-on-plate welds, surfacing conditions optimum parameters.

Постановка проблемы. Проблема формирования наплавленного валика и его размеров определяет эффективность использования легирующих элементов в наплавленном слое, уменьшение отходов при механической его обработке.

Анализ последних исследований и публикаций. Вопросам формирования наплавленного слоя при наплавке лентой посвящено большое количество исследований [1-9].

Установлено, что для широкослойной наплавки при ширине наплавки $b > 40$ мм хорошее формирование наплавленного слоя достигается при $3,5 \leq V_n/V_n \leq 4,5$ (V_n , V_n – соответственно скорости подачи ленты и наплавки). Однако имеющиеся опытные данные по узкослойной наплавке при ширине наплавки $b \leq 40$ мм не укладываются в эти рамки и это потребовало изучения вопроса формирования металла при наплавке.

Обычно в сварочной литературе [3,10,12] для определения «естественной» высоты ванны жидкого металла, при которой выполняется условие гидростатического (межфазного) равновесия, используется формула, вытекающая из уравнения Юнга [11]:

* В рукописях В.А. Муратова были найдены материалы практически законченной статьи, которые не утратили актуальности и сегодня. Материал статьи подготовлен к публикации И.В. Пентеговым, д-р. техн.наук., профессор, вед. науч. сотр. отдела электротермии института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, г. Киев
А.Д. Размышляевым, д-р. техн.наук., профессор, Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь
М.В. Мироновой, к-т.техн.наук., ст. преподаватель, Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь
Редакция.

$$h_m = 2 \sqrt{\frac{\sigma_{12}}{(\gamma - \gamma')g}} \cdot \sin \frac{\nu}{2} \quad (1)$$

где h_m – максимальная высота наплавки наплавленного слоя;
 σ_{12} – сила поверхностного натяжения, действующая на границе раздела жидкий металл – жидкий флюс;

ν – краевой угол;

γ – плотность жидкого металла;

γ' – плотность жидкого флюса;

g – ускорение силы тяжести, m/c^2 , $g = 9,807 m/c^2$.

Расчет размеров валика при свободном растекании наплавленного металла по горизонтальной поверхности изделия проведен в работе [3]. Однако в этой работе не получено хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных.

Цель статьи – рассмотрение условий оптимального формирования наплавленного слоя при использовании новых представлений о невозможности гидростатического равновесия (в обычном его понимании) в непрерывно затвердевающей ванне.

Изложение основного материала. Рассмотрим процесс формирования наплавленного валика с учетом процесса кристаллизации металла на боковых поверхностях валика. На рис. 1 приведены виды сбоку и сверху зоны наплавки, а также конфигурация двух сечений наплавленного металла (по А-А и В-В). Форма жидкой ванны в плане близка к полуэллипсу [2]. По периметру жидкометаллическая ванна ограничена буртиком из затвердевшего металла, препятствующего свободному растеканию жидкого металла. Высота буртика плавно растет по мере отдаления рассматриваемого сечения от электродной ленты. Так в сечении по А-А высота буртика Δ_A меньше чем высота буртика Δ_B в сечении по В-В. Для рассматриваемого процесса характерно то, что на интервале между двумя выбранными сечениями с ростом высоты буртика

растет и уровень наивысшей точки прослойки жидкого металла. При этом высота столба металла h_A в сечении А-А, соответствующего началу формирования буртика, значительно меньше высоты наплавленного валика h_m . То же самое можно сказать о высоте столба металла h_B в сечении В-В. Поэтому кривизна поверхности на краю наплавленного валика существенно меньше кривизны, которую получают для случая «свободного» растекания.

Рост буртика происходит в области сильных гидродинамических течений и колебаний ванны в связи с переходом капель в жидкий металл и перемещением дуги по торцу ленты. Жидкометаллическая ванна находится в своеобразной изложнице.

Согласно [12] для флюса АН-348А и боль-

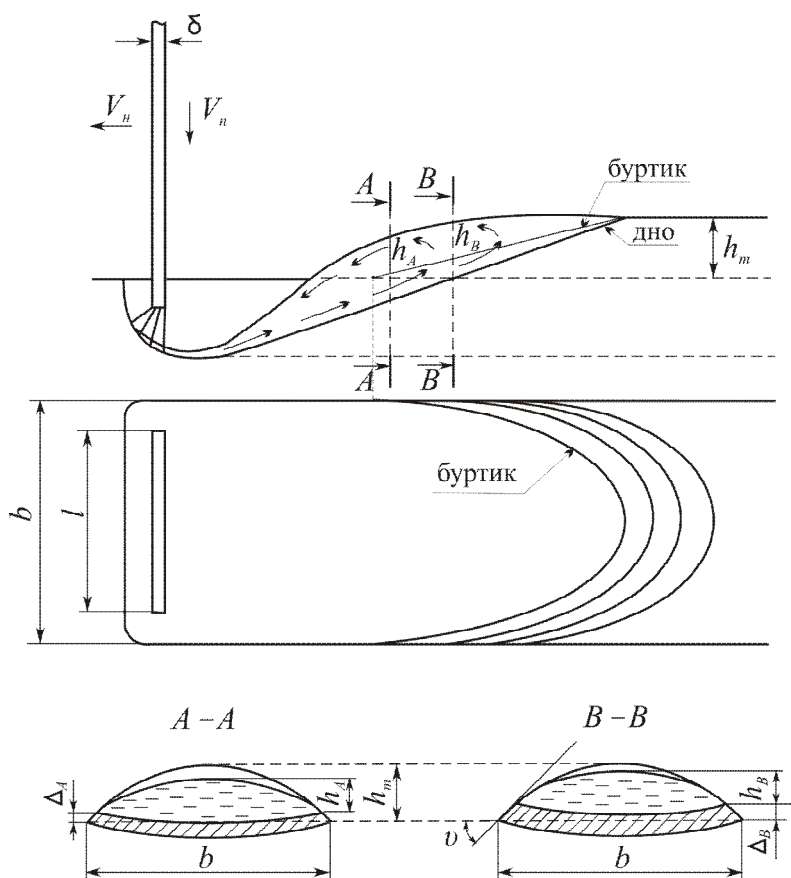


Рис. 1 – Изменение геометрии валика в процессе наплавки (пояснения даны в тексте)

таблицы построены зависимости относительной ширины наплавки b/l от безразмерного критерия $(\delta/l) \cdot (V_n/V_H)$, где δ и l – толщина и ширина ленты (рис. 3,а) и зависимость b/l от отношения (V_n/V_H) , рис. 3,б), для всех указанных размеров лент.

Из графиков рис. 3,а следует, что все опытные точки для всех трех лент выстраиваются вблизи прямой (линейная регрессия), которую легко аппроксимировать в виде

$$\frac{b}{l} = 0,705 + 2,76 \left(\frac{\delta V_n}{l V_H} \right) \quad (2)$$

Здесь все коэффициенты безразмерны, а безразмерный критерий $(\delta/l) \cdot (V_n/V_H)$ является влияющим и его использовали в дальнейшем. Погрешность вычислений по формуле (2) не превышает $\pm 10\%$ во всем рассмотренном диапазоне изменений параметров наплавки.

Кривые на рис. 3,б менее информативны, однако и они позволяют сделать ряд выводов. Для каждой ленты опытные данные ложатся на две ветви. Та ветвь, которая начинается ниже, соответствует случаю $V_H = \text{const}$, $V_n = \text{varia}$, другая ветвь – случаю $V_n = \text{const}$, $V_H = \text{varia}$. Там, где ветви совпадают, параметры наплавленного валика практически не меняются при изменении абсолютных значений V_n и V_H , если их отношение остается неизменным.

Определим отношение объема наплавленного металла к объему подаваемой ленты за одно и то же время как:

$$K_m = \frac{h_{cp} b V_n}{\delta l V_H} \quad (3)$$

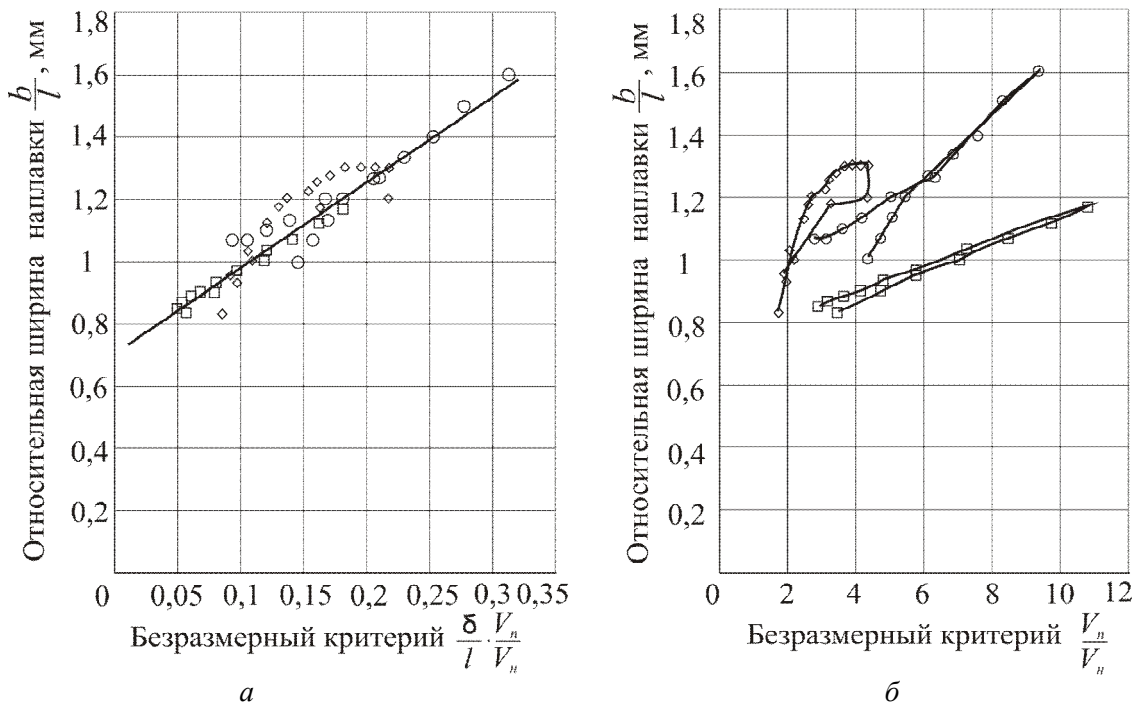


Рис.3 – Зависимость относительной ширины наплавки от безразмерных критериев:
 □ – лента 1 мм x 60 мм; ◇ – лента 2 мм x 40 мм; ○ – лента 1 мм x 30 мм

При этом коэффициент потерь металла на угар и разбрызгивание равен

$$\psi = 1 - K_m \quad (4)$$

Установлено, что среднее значение равно $K_{m, \text{ср}} = 0,745$ и отклонение от этого значения не превышает 4,5%, а среднее значение коэффициента потерь металла равно $\psi_{\text{ср}} = 0,255$.

Из формулы (3) с использованием формулы (2) получено выражение для средней толщины наплавки в безразмерной форме с использованием среднего значения коэффициента K_m :

$$\frac{h_{cp}}{l} = \frac{K_m}{b} l \left(\frac{\delta V_n}{l V_H} \right) = \frac{0,745}{0,705 + 2,76 \left(\frac{\delta V_n}{l V_H} \right)} \left(\frac{\delta V_n}{l V_H} \right) \quad (5)$$

На рис. 4 приведені все точки експеримента для параметра h_{cp}/l як функції от $(\delta/l) \cdot (V_n/V_n)$ (рис. 4,а) и от (V_n/V_n) (рис. 4,б). Очевидно, что графики на рис. 4,б малоинформативны, а точки на рис. 4,а плотно ложатся вблизи жирной сплошной кривой, построенной по уравнению (5). Отклонения от этой кривой не превышает 11%.

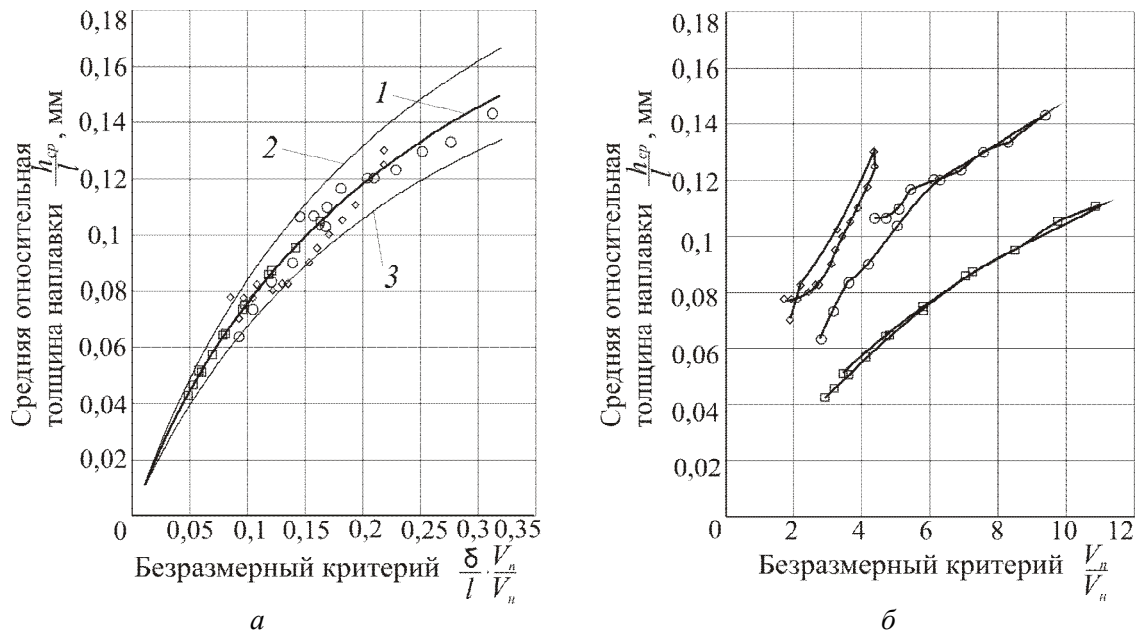


Рис. 4 – Зависимость средней относительной толщины наплавки от безразмерных критериев:

1 – средняя относительная толщина наплавки (аппроксимация); 2 – верхняя граница разброса значений h_{cp}/l ; 3 – нижняя граница разброса значений h_{cp}/l ; \square – лента 1 мм x 60 мм; \diamond – лента 2 мм x 40 мм; \circ – лента 1 мм x 30 мм

Аналогичным образом обрабатывали опытные данные для максимальной высоты наплавленного валика h_m . Данные показали, что все опытные точки для всех трех лент выстраиваются вблизи прямых (линейная регрессия), которые различны для разных лент (рис.5). Наклон этих прямых пропорционален δ . В этом случае линии регрессии аппроксимируются

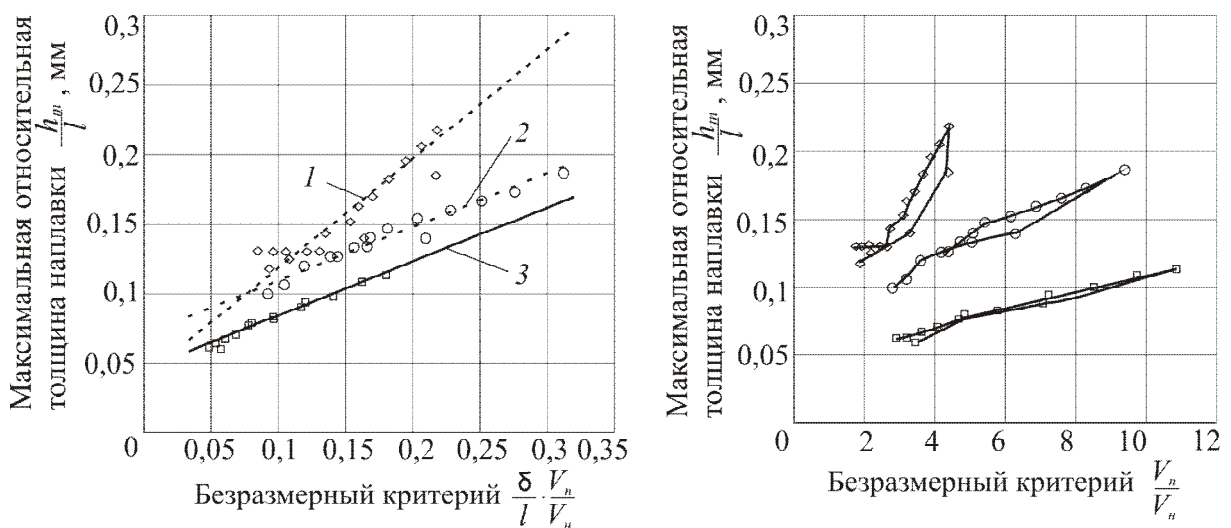


Рис. 5 – Зависимость максимальной относительной толщины наплавки от безразмерных критериев:

1 – лента 1 мм x 30 мм (аппроксимация); 2 – лента 2 мм x 40 мм (аппроксимация); 3 – лента 1 мм x 60 мм (аппроксимация); \square – Лента 1 мм x 60 мм; \diamond – Лента 2 мм x 40 мм; \circ – Лента 1 мм x 30 мм

одной формулой более сложного вида:

$$\frac{h_m}{l} = 0,07 \left(\frac{\delta \delta_0}{\delta} \right)^{0,5} \left(\frac{l_0}{l} \right)^{0,64} + 0,39 \frac{\delta}{\delta_0} \left(\frac{\delta V_n}{l V_n} \right) \quad (6)$$

где базовые величины $\delta_0 = 1$ мм и $l_0 = 30$ мм, а все коэффициенты безразмерны.

Анализ полученных результатов показал, что безразмерные параметры b/l , h_{cp}/l , h_m/l зависят от безразмерного критерия $(\delta/l) \cdot (V_n/V_n)$ и выражаются через него простыми формулами. Чем меньше значение этого критерия, тем меньше толщина наплавленного слоя и его ширина. Однако, его нельзя уменьшать ниже определенного уровня. Когда величина b/l становится меньше 1, то происходит нарушение сплошности наплавленного валика, образуются обособленные участки. Для получения качественной наплавки необходимо, чтобы отношение b/l было больше 1,05...1,1. Это условие позволяет с помощью рис.1 определить левую границу допустимых режимов наплавки, показанную на рис. 6.

Если критерий $(\delta/l) \cdot (V_n/V_n)$ чрезмерно велик, то наплавленный валик характеризуется натеками и наплывами расплавленного металла. Поэтому правая граница допустимых режимов наплавки, показанная на рис. 6 была получена посредством визуального анализа на отсутствие натеков и наплывов.

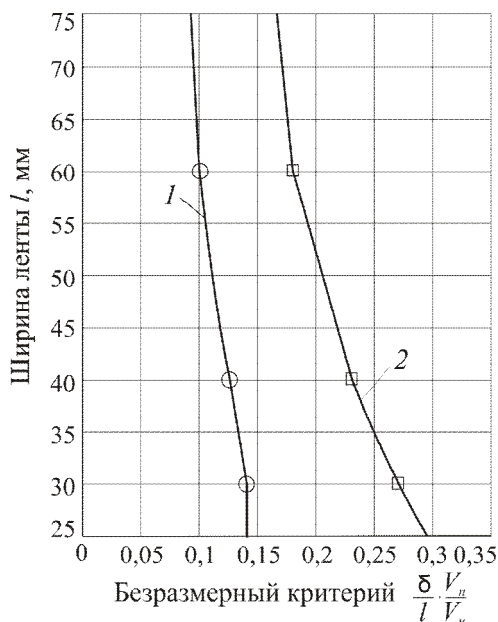


Рис. 6 – Область оптимальных режимов наплавки в зависимости от ширины ленты:

1 – левая граница приемлемых режимов;
 2 – правая граница приемлемых режимов

Максимальная высота валика (h_m) лежит в интервале от 3 до 9 мм и зависит от ширины и толщины ленты для всех рассмотренных лент (см. таблицу).

Формула (1) дает заведомо заниженный результат и не учитывает влияние геометрических размеров ленты. Поэтому для расчетов формы и размеров наплавленных валиков невозможно пользоваться формулой (1), полученной из условия гидростатического равновесия жидкометаллической ванны.

Кривые на рис.6 можно использовать для лент любой ширины. Если поставлена задача получить наплавку минимальной толщины, то режимы надо выбирать вблизи левой границы зоны приемлемых режимов.

Среднее значение коэффициента формы K_ϕ , характеризующего степень отклонения формы валика от прямоугольной, $K_{\phi cp} = 0,673$.

Взаимосвязи скорости подачи ленты V_n с плотностью тока в ленте J и с током наплавки I для серии наплавов, приведенных в таблице, прямо пропорциональны и зависимость между ними выражены простыми формулами:

$$J = J_0 \frac{V_n}{V_{n0}} \quad (8)$$

$$I = I_0 \frac{V_n}{V_{n0}} \frac{\delta l}{\delta_0 l_0} \quad (9)$$

где базовые величины равны: $J_0 = 20$ А/мм², $V_{n0} = 60$ м/час, $\delta_0 = 1$ мм, $l_0 = 30$ мм, $I_0 = J_0 \delta_0 l_0 = 600$ А.

Базовые величины выбраны таким образом, что точки с координатами $(I_0, \delta_0 l_0 V_{n0})$ и (J_0, V_{n0}) лежат на усредненных аппроксимационных прямых. При выборе токов и плотностей тока в ленте допускаются отклонения от полученных по формулам (8) и (9) значений на $\pm 15...20\%$ без потери качества наплавки.

Установлено, что глубина проплавления возрастает с ростом высоты валика наплавки и с ростом скорости наплавки (глубина проплавления составляет $(1,05...1,1) \cdot h_m$ при $V_n < 25...30$ м/час и возрастает до $(1,25...1,4) \cdot h_m$ при $V_n > 35$ м/час).

Полученные зависимости и аппроксимационные формулы позволяют выбрать параметры режима наплавки и оценить ожидаемый результат: величины b , h_{cp} , h_m , и коэффициент K_ϕ .

Рассмотренный подход может быть применен при анализе наплавки другими типами лент на обычных и форсированных режимах с применением других типов флюсов.

Выводы

1. Установлено, что жидкометаллическая ванна ограничена буртиком из затвердевшего металла. Рост буртика происходит в области сильных гидродинамических течений в ванне жидкого металла и колебаний ванны в связи с переходом капель в жидкий металл и перемещением дуги по торцу ленты. Эти условия отличаются от условий свободного растекания жидкого металла по плоской поверхности.
2. С использованием методов безразмерных критериев подобия и теории размерностей получены аппроксимирующие формулы, позволяющие определить ширину наплавки, высоту и среднюю толщину наплавленного валика, а также коэффициент его формы при дуговой наплавке лентой под флюсом.

Список использованных источников:

1. Госбюджетный отчет кафедры «Металлургия и технология сварочного производства». – Жданов: ЖдМИ, 1981. – С. 21 – 32.
2. Фрумин И.И. Автоматическая электродуговая наплавка / И.И. Фрумин. – Харьков: Metallurgizdat, 1961. – 421 с.
3. Электродуговая наплавка деталей группой пластинчатых электродов / А.Я. Шварцер, В.П. Пономаренко, В.П. Стойко, В.М. Бандалин // Сварочное производство. – 1981. – № 1. – С. 23 – 26.
4. Рабинович А.Ш. Самозатачивающиеся плужные лемехи и другие почворезущие детали машин / А.Ш. Рабинович. – М.: ГОСНИТИ, 1962. – 165 с.
5. Опарин Л.И. Некоторые итоги и перспективы применения наплавки спеченными электродными лентами / Л.И. Опарин. // Автоматическая сварка. – 1981. – № 8. – С. 61 – 64.
6. Маликин В.Л. Влияние режима наплавки спеченной электродной лентой на производительность процесса и формирование наплавленного слоя / В.Л. Маликин, Л.И. Опарин // Автоматическая сварка. – 1981. – № 6. – С. 45 – 47.
7. Горохольский Н.Ф. Восстановление деталей машин и механизмов сваркой и наплавкой / Н.Ф. Горохольский. – М.-Л.: Машиностроение, 1966. – 275 с.
8. Исследование процесса плавления ленточного электрода при наплавке под флюсом / Л.К. Лещинский, П.Ф. Лаврик, В.В. Тарасов, В.А. Бесхлебный // Сварочное производство. Сб. научн. трудов ЖМИ, вып. 17, Высшая школа, Мариуполь. – 1972. – С. 80 – 88.
9. Тарасов В.В. Влияние параметров режима на геометрию шва при наплавке ленточным электродом под керамическим флюсом / В.В. Тарасов, П.Ф. Лаврик, Л.К. Лещинский // Сварочное производство. Сб. научн. трудов ЖМИ, вып. 17, Высшая школа, Мариуполь. – 1972. – С. 147 – 150.
10. Пацкевич И.Р. Поверхностные явления в сварочных процессах / И.Р. Пацкевич, Г.Ф. Деев. – М.: Metallurgia, 1974. – 120 с.
11. Сивухин Д.В. Общий курс физики, Т.2. Термодинамика и молекулярная физика. / Д.В. Сивухин. – М.: Наука, 1990. – 551 с.
12. Якобашвили С.Б. Поверхностные свойства сварочных флюсов и шлаков / С.Б. Якобашвили. – К.: «Техніка», 1970. – 208 с.
13. Березовский Б.М. Смачивание и растекание сварочной ванны на поверхности металла / Б.М. Березовский // Автоматическая сварка. – 1983. – №10. – С. 31-34.
14. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике/ Л.И. Седов М.: Наука. – 1972. – 440 с.
15. Хантли Г. Анализ размерностей / Г. Хантли. – М.: Мир, 1970. – 175 с.

Рецензент: В.В. Чигарев,
д-р техн. наук, проф., ПГТУ

Статья поступила 12.04.2010