



## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ПРИ ДУГОВОЙ НАПЛАВКЕ ПОД ФЛЮСОМ

Д. Г. НОСОВ, инж. (Днепродзержин. гос. техн. ун-т),  
А. Д. РАЗМЫШЛЯЕВ, д-р техн. наук (Приазов. гос. техн. ун-т, г. Мариуполь)

Для расширения возможностей управления формой и размерами зоны проплавления при дуговой наплавке проволокой под флюсом предложено использовать комбинацию трех магнитных полей. С использованием метода планирования экспериментов и регрессионного анализа разработаны математические модели, устанавливающие связь между индукцией составляющих комбинированного магнитного поля (КМП) и размерами сечения наплавляемого валика. Составлена программа расчета и оптимизации технологических режимов дуговой наплавки в КМП с удобным интерфейсом и показана степень влияния индукции составляющих, а также комбинации этих составляющих магнитных полей на размеры сечения наплавляемых валиков.

*Ключевые слова:* электродуговая наплавка, наплавленный валик, размер валика, управляющие магнитные поля, асимметрия, математические модели, дисперсионный анализ

В условиях экономии энергоресурсов, дефицитных и дорогостоящих материалов наибольший интерес представляет разработка такого способа наплавки, который позволил бы решать следующие технологические задачи: уменьшить долю участия основного металла в наплавленном; повысить производительность наплавки; уменьшить расходы на механическую обработку и повысить служебные свойства изделий.

Поставленные задачи можно решить путем управления конфигурацией и геометрическими размерами сечения наплавляемого валика. Реализа-

ция процесса наплавки валика с его управляемой конфигурацией возможна в рамках одновременного действия при дуговой наплавке нескольких магнитных, т. е. комбинированных магнитных полей (КМП).

На рис.1 схематически показаны поперечные сечения валиков, наплавленных по классической технологии без использования магнитных полей (МП) (рис. 1, а), с использованием только продольного МП (рис. 1, б) и с предлагаемой в настоящей работе системой КМП (рис. 1, в).

Для наплавки необходимо, чтобы валик в поперечном сечении имел минимальные значения  $F_{np}$ ,  $F_o$ ,  $h$  при максимальных значениях  $F_{np}$ ,  $F_{\delta}$ ,  $g$ ,  $b$  (рис. 1, а). Кроме того, разность  $(g - g_M)$ , показывающая припуск на механическую обработку

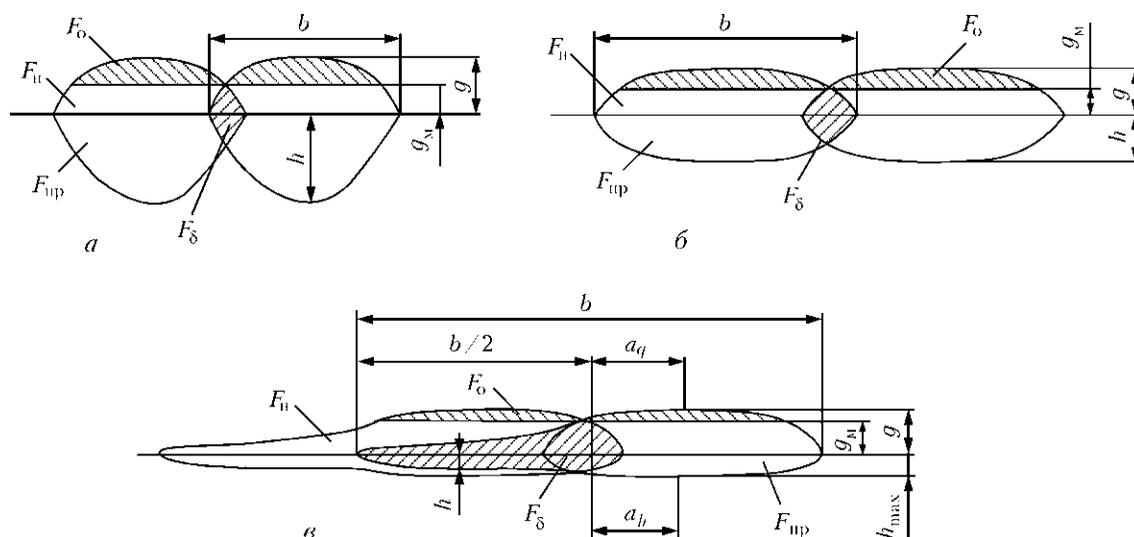


Рис. 1. Схематическое изображение поперечного сечения валиков, наплавленных без использования МП (а), с использованием МП (б) и с применением КМП (в)



наплавленной поверхности, должна быть наименьшей. Частично это достигается при наплавке с использованием только одного продольного МП (рис. 1, б), но наиболее полно указанным условиям отвечает форма сечения валика, приведенная на рис. 1, в.

Достичь указанной формы валика возможно, как полагалось, используя при наплавке комбинацию трех МП, действующих одновременно на сварочную дугу и жидкий металл сварочной ванны: аксиального постоянного; поперечного импульсного однополярного и аксиального переменного установившей частоты.

Под воздействием аксиального постоянного МП, соосного электроду, достигаются нереверсивные перемещения расплава ванны. Дуга вращается вокруг оси и приобретает колоколообразную конусную форму [1–3]. При этом размеры активного пятна дуги на изделии возрастают. Ширина валика также увеличивается и в результате «размывания» боковых поверхностей ванны горячими потоками расплава, что является положительным фактором при наплавке.

При действии поперечного импульсного однополярного МП на дугу возникает электромагнитная сила, которая отклоняет дугу перпендикулярно вектору скорости наплавки. Это позволяет, как показано в работе [4], обеспечить поперечное отклонение активного пятна дуги на изделии до 10...12 мм. Поперечные отклонения дуги позволяют изменить форму сечения валика, повлияв на скорость потока расплава, направив его вдоль линии сплавления, и в силу своей однополярности вызовут асимметрию зоны проплавления, необходимую для наплавки смежными валиками, и формы усиления валика, как это показано на рис 1, в.

Воздействуя аксиальным знакопеременным МП на хвостовую часть ванны, можно предотвратить нежелательное увеличение глубины проплавления в зоне асимметрии. В результате действия этого поля формируются вихревые потоки расплава, образующие эффект «устойчивой волны», увеличивая толщину жидкой прослойки под дугой, поскольку массивная волна имеет значительную инерционность и при быстром изменении полярности МП реверсивных движений расплава в ванне не возникнет.

С целью подтверждения высказанных предположений и разработки математической модели, позволяющей установить параметры индукции каждого поля в указанной комбинации трех МП, обеспечивающих необходимую форму сечения валика, проведена серия экспериментальных наплавов, для уменьшения количества которых использовали центральный композитный ротативный пятиуровневый полнофакторный план экспериментов, состоящий из 20 серий. Экспе-

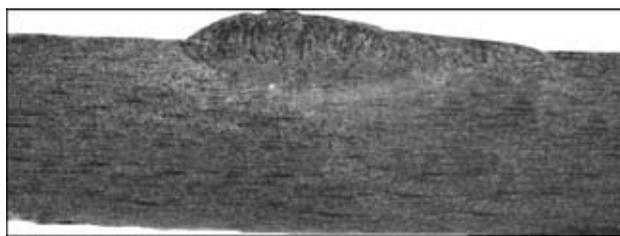


Рис. 2. Макрошлиф валика, наплавленного с использованием КМП

рименты проводили произвольно во избежание появления систематической погрешности в методике.

Наплавки выполняли на листы из стали Ст3сп (ГОСТ 380–90) толщиной 50 мм сварочным трактором АДС-1004 от источника питания дуги ВДУ-1001 проволокой Св-08А диаметром 3, 4 и 5 мм под флюсом АН-348А. МП генерировали специальным устройством, состоящим из трех независимых электромагнитов. Использовали следующие параметры режима наплавки в КМП: ток наплавки 450...750 А, напряжение дуги 26...34 В, вылет электрода 25...30 мм, скорость наплавки 0,8...1,6 см/с. Расстояние от торцов электромагнитов до изделия составляло 10...15 мм. Индукция аксиального постоянного МП, симметричного относительно оси электрода,  $B_z$  — 30...60 мТл; индукция поперечного импульсного однополярного МП  $B_y$  — 50...100 мТл. В хвостовой части ванны действует аксиальное знакопеременное МП установленной частоты с индукцией  $B_x$  — 40...80 мТл. Указанный диапазон индукций КМП при отработанных оптимальных режимах наплавки обеспечивает удовлетворительное качество наплавленного валика.

Параметры валика (ширину  $b$ , высоту  $g$ , максимальную глубину проплавления  $h_{max}$ , глубину проплавления ровного участка  $h$ , отклонение высоты валика  $a_g$  и глубины проплавления  $a_h$ ) определяли из макрошлифов наплавов. В качестве примера на рис. 2 приведен макрошлиф валика, полученного при наплавке с использованием КМП.

Для прогнозирования геометрических размеров валика использовали регрессионный метод. Функция поверхности отклика, отображающая любой размер в сечении валика, может быть выражена как  $y = f(B_z, B_y, B_x)$ , а выбранная зависимость, являющаяся поверхностью отклика второго порядка, следующим образом [5]:

$$y = b_0 + b_1 B_z + b_2 B_y + b_3 B_x + b_{11} B_z^2 + b_{22} B_y^2 + b_{33} B_x^2 + b_{12} B_z B_y + b_{13} B_z B_x + b_{23} B_y B_x, \quad (1)$$

где  $b_0, b_1, b_2, b_3$  — соответственно постоянный член и коэффициенты линейных членов;  $b_{11}, b_{22}, b_{33}$  — коэффициенты квадратных членов второго



порядка;  $b_{12}$ ,  $b_{13}$ ,  $b_{23}$  — коэффициенты взаимодействующих членов второго порядка.

Коэффициенты приведенного выше полиномиального уравнения определяли с помощью математического пакета Nonlinear Models STATISTICA 6.0.

Значимость коэффициентов проверяли с помощью  $t$ -теста, а также метода обратного исключения. Адекватность разработанной модели проверяли с помощью регрессионного анализа.

Получены следующие уравнения для геометрических параметров валиков:

$$b = 24,12614 - 0,27163B_z - 0,03248B_y - 0,21372B_x + 0,00474B_z^2 + 0,00115B_y^2 + 0,00204B_x^2 + 0,00083B_zB_y + 0,00113B_zB_x + 0,00053B_yB_x,$$

$$a_g = -0,211365 - 0,031212B_z + 0,086273B_y - 0,022159B_x + 0,00052B_z^2 - 0,000433B_y^2 + 0,000105B_x^2 + 0,000533B_zB_y - 0,000417B_zB_x + 0,0008B_yB_x,$$

$$a_h = 0,03066 - 0,051477B_z + 0,076114B_y - 0,002983B_x + 0,000545B_z^2 - 0,000484B_y^2 - 0,000162B_x^2 + 0,000767B_zB_y - 0,000208B_zB_x + 0,000675B_yB_x,$$

$$h_{\max} = 2,813634 - 0,017145B_z + 0,007273B_y - 0,027784B_x - 0,000369B_z^2 + 0,000187B_y^2 + 0,000199B_x^2 - 0,000333B_zB_y + 0,00075B_zB_x - 0,0002B_yB_x,$$

$$h = 0,64659 - 0,010114B_z + 0,023432B_y + 0,007415B_x + 0,000328B_z^2 + 0,000118B_y^2 + 0,000247B_x^2 - 0,0005B_zB_y - 0,000208B_zB_x - 0,000375B_yB_x,$$

$$g = 0,82159 + 0,039053B_z + 0,013432B_y + 0,013665B_x - 0,000727B_z^2 + 0,000198B_y^2 - 0,000097B_x^2 - 0,000033B_zB_y + 0,000125B_zB_x - 0,000275B_yB_x.$$

Точность моделей подвергали оценке путем выполнения наплавки на том же экспериментальном оборудовании. Установлено, что геометрические размеры валиков, полученные экспериментальным путем, с достаточной точностью соответствуют размерам, полученным по указанным уравнениям.

Геометрические параметры наплавленного в КМП валика зависят от диаметра электродной проволоки  $d_3$ . Поэтому корректировку режимов выполняли блочно для электродов диаметром 3, 4 и 5 мм. Экспериментально определяли корректирующие коэффициенты, учитывающие измене-

ние формы валика наплавки при изменении основных параметров режима наплавки.

Параметром оптимизации, наряду с размерами валика наплавки, была принята доля основного металла  $\gamma$ . Авторами предложена формула для определения конфигурации валика с учетом его изменения под воздействием КМП:

$$\gamma = \frac{F_{i8}}{F_i + F_{i8}} = \frac{\frac{\pi}{4} h_{\max} (b - 2a_h) + 2a_h h}{\frac{\pi}{4} (g_{\max} (b - 2a_g) + h_{\max} (b - 2a_h)) + \frac{2}{3} a_g g + 2a_h h} \quad (2)$$

Обработка данных по формуле (2) показала, что при наплавке с использованием КМП доля основного металла в наплавленном снижается в 1,6...1,8 раза.

Для расчета оптимальных значений индукции каждой из трех составляющих КМП, при которых возможно получение заданных размеров сечения валиков, была составлена программа на языке Delphi версии 7.0. Интерфейс расчетной программы представлен на рис. 3. Примеры протоколов, полученных с использованием этой программы, приведены в таблице. Задавали следующие параметры: ширина валика  $b = 25$  мм; глубина проплавления  $h = 1,2$  мм; высота валика  $g = 2,5$  мм; асимметрия валика  $a_h = 5,2$  мм. Сопоставление на соответствие показало, что рассчитанные с помощью программы параметры КМП с достаточной точностью обеспечивают совпадение расчетных размеров сечения валиков с размерами, полученными экспериментально.

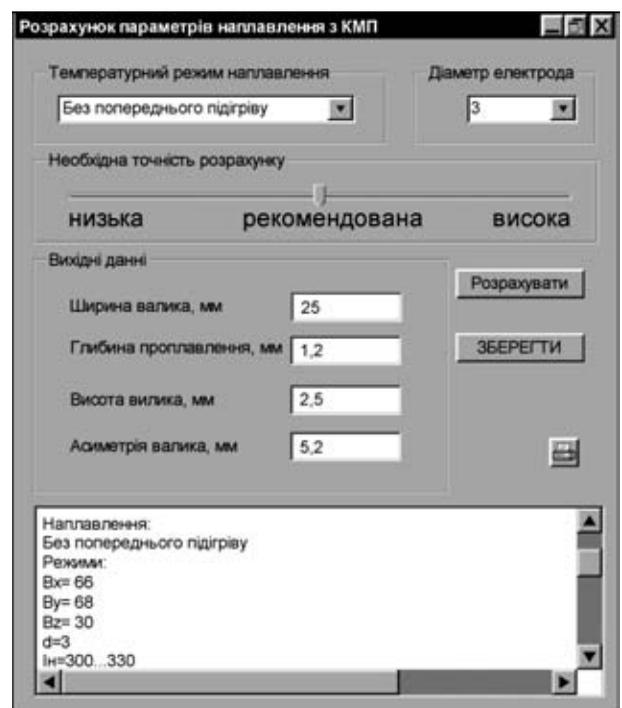


Рис. 3. Интерфейс расчетной программы



Примеры протоколов определения режимов наплавки в КМП

Необходимая точность расчета		
низкая	рекомендованная	высокая
Наплавка: Без предварительного подогрева Режимы: $B_x = 79$ $B_y = 58$ $B_z = 42$ $d = 3$ $I_n = 300...330$ $v_n = 0,8...0,9$ $U_d = 30...32$ Ожидаемые параметры валика: $b = 27,11124$ $h = 1,05732$ $g = 2,172986$ $a_h = 4,640861$	Наплавка: Без предварительного подогрева Режимы: $B_x = 77$ $B_y = 63$ $B_z = 33$ $d = 3$ $I_n = 300...330$ $v_n = 0,8...0,9$ $U_d = 30...32$ Ожидаемые параметры валика: $b = 25,64897$ $h = 1,262843$ $g = 2,342799$ $a_h = 4,949911$	Наплавка: Без предварительного подогрева Режимы: $B_x = 68$ $B_y = 67$ $B_z = 31$ $d = 3$ $I_n = 300...330$ $v_n = 0,8...0,9$ $U_d = 30...32$ Ожидаемые параметры валика: $b = 24,66757$ $h = 1,208794$ $g = 2,545103$ $a_h = 5,163543$

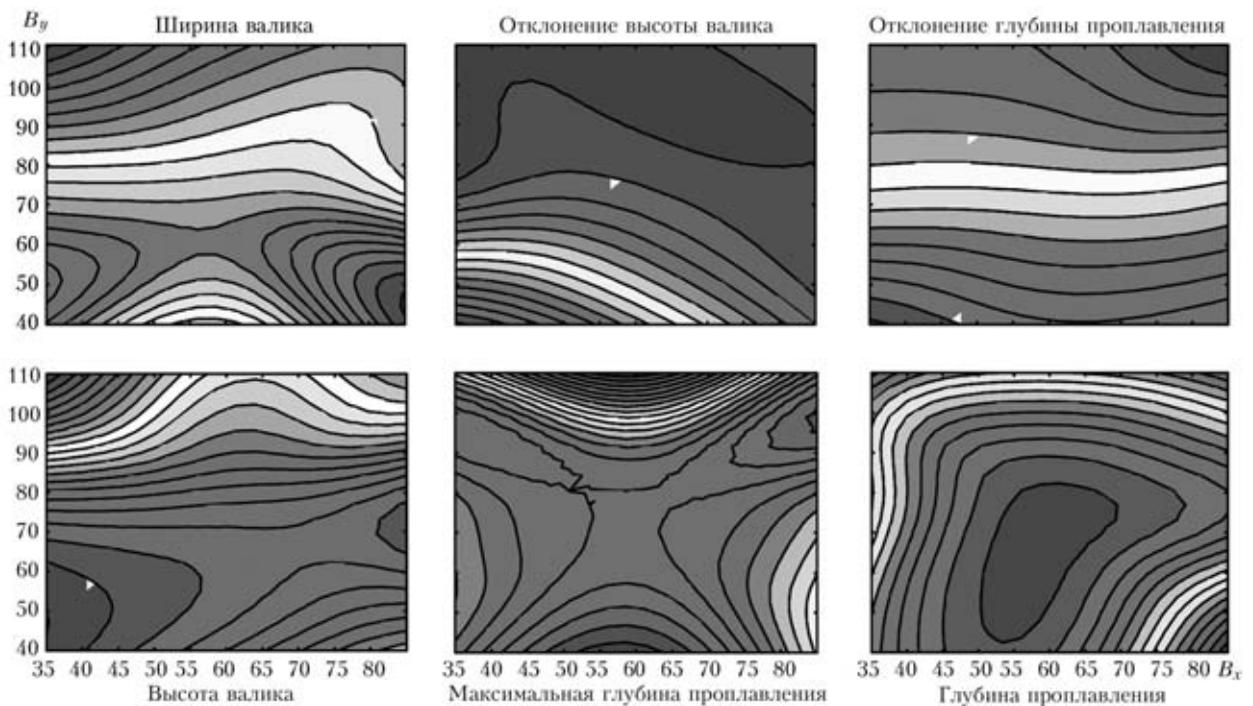


Рис. 4. Влияние индукции поперечного импульсного однополярного МП  $B_y$  и индукции аксиального переменного МП установленной частоты  $B_x$  на параметры валика

На основе указанных уравнений, связывающих индукцию КМП, применяемую при электродуговой наплавке, с геометрическими размерами сечения валика, построены графики поверхности отклика, которые приведены на рис. 4–6. Эти данные позволяют проанализировать влияние значений индукций МП, входящих в состав КМП, на размеры сечения валика.

Данные показали, что при минимальном значении индукции  $B_y$  ширина валика незначительно возрастает в диапазоне индукций  $B_x$  от 40 до 57 мТл. Данная тенденция может быть обусловлена положительным влиянием аксиального МП на гидродинамику поверхностного слоя жидкого

металла ванны. Максимальное увеличение ширины валика наблюдается при индукции  $B_y$  от 90 мТл, если значения  $B_x$  составляют 35...70 мТл. Это объясняется значительным отклонением дуги в одну из сторон перпендикулярно вектору наплавки и возвратно-поступательными ее движениями под воздействием индукции  $B_x$ .

При одновременном увеличении индукций  $B_y$  и  $B_x$  наблюдается устойчивое возрастание асимметрии валика по высоте, тогда как на асимметрию валика по глубине основным влияющим фактором является значение индукции  $B_y$ . В качестве оптимальной можно принять значение индукции  $B_y$  в пределах от 80 до 110 мТл.

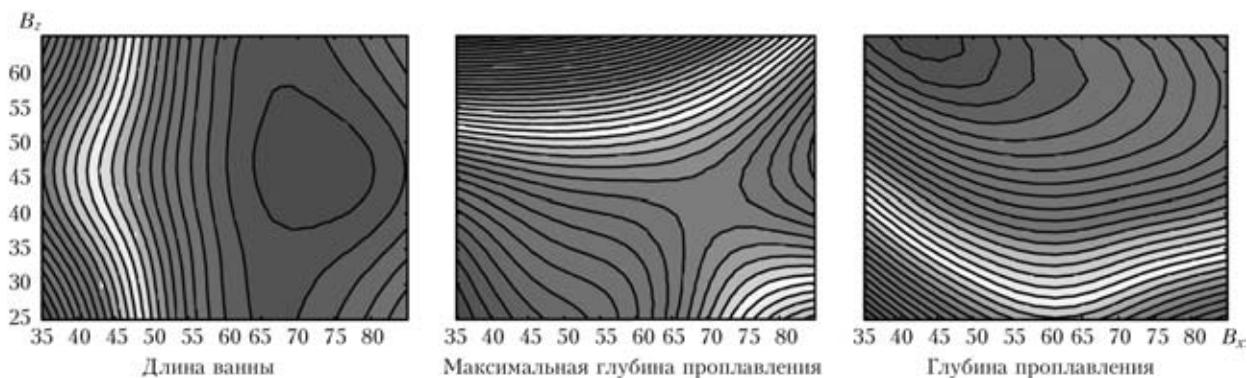


Рис. 5. Влияние индукции аксиального постоянного МП  $B_z$  и индукции аксиального переменного МП установленной частоты  $B_x$  на параметры валика

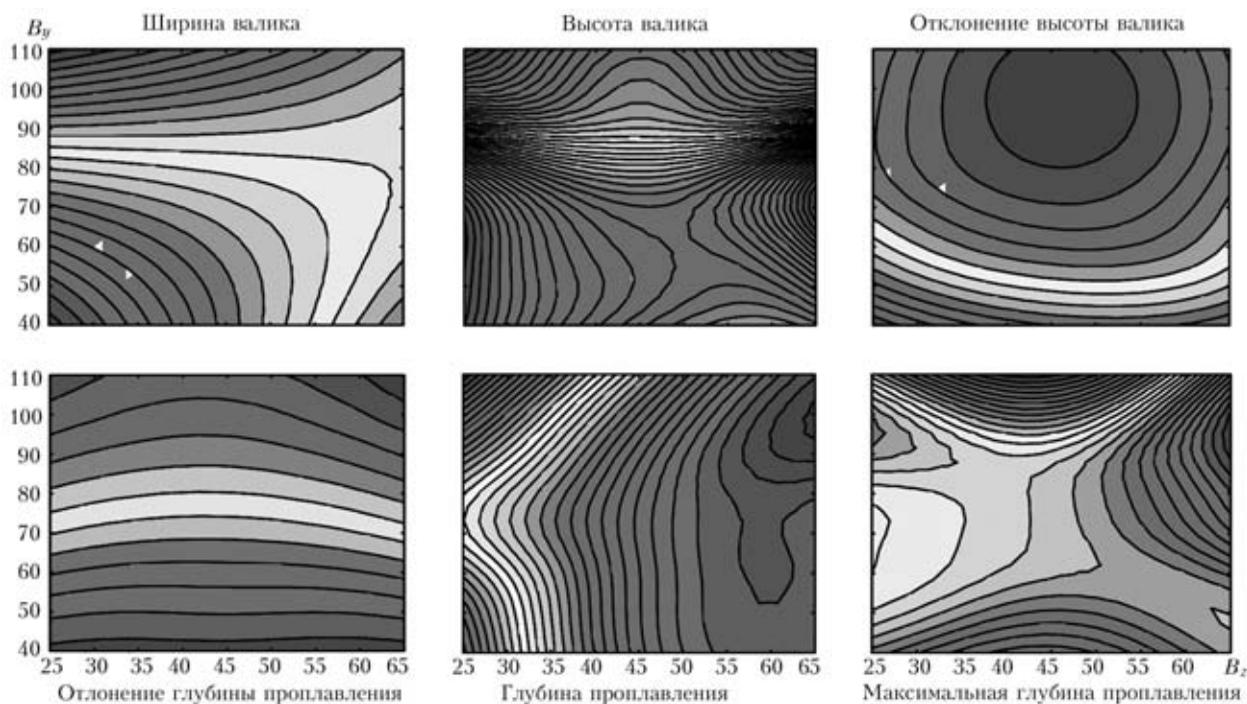


Рис. 6. Влияние индукции поперечного импульсного однополярного МП  $B_y$  и индукции аксиального постоянного магнитного поля  $B_z$  на параметры валика

Характерные изменения высоты валика и максимальной глубины проплавления под воздействием  $B_y$  и  $B_x$  показаны на рис. 4. Высота валика уменьшается, а глубина проплавления в смещенной части ее увеличивается при одновременном воздействии поперечного импульсного однополярного МП в пределах от 92 до 110 мТл для аксиального переменного МП в пределах от 35 до 62 мТл.

Получение минимального значения глубины проплавления возможно в достаточно широком диапазоне параметров  $B_y$ - $B_x$ . Оптимальным можно принять диапазон  $B_x$  от 45 до 76 мТл при индукции  $B_y = 66...88$  мТл.

Группа индукций  $B_x$ - $B_z$  значительно влияет на глубину проплавления основного металла, а следовательно, и долю основного металла в наплавленном. Оптимальным является диапазон индук-

ций  $B_z$  от 55 до 65 мТл при значении индукции  $B_x$  в пределах от 35 до 70 мТл. Влияние этой группы индукций на другие размеры сечения валика незначительное.

Группа индукций  $B_y$ - $B_z$  оказывает существенное влияние на ширину валика и приводит к увеличению этого параметра во всем диапазоне индукций (рис. 6). Максимальное значение ширины валика наблюдается при изменении индукции  $B_y$  в пределах от 94 до 110 мТл, если значение индукции  $B_z$  находится в пределах 25...55 мТл. Следует отметить, что в данном диапазоне индукций  $B_y$  увеличение индукции  $B_z$  приводит к незначительному уменьшению ширины валика. Последнее, очевидно, связано со стабилизирующим воздействием на дугу аксиального постоянного МП (с индукцией  $B_z$ ).



Высота валика увеличивается при воздействии на ванну поперечным МП индукцией 86...110 мТл. Влияние же постоянной аксиальной составляющей КМП индукции  $B_z$  на данный параметр незначительно. Однако в диапазоне индукций  $B_z = 42...47$  мТл наблюдается тенденция к уменьшению высоты валика на 8...10 % при значительном увеличении асимметрии валика  $a_g$ . Установлено, что максимальное влияние на асимметрию валика как по высоте, так и по глубине оказывает импульсное однополярное поперечное МП  $B_y$ . Кроме того, при индукции  $B_y$  порядка 100...110 мТл наблюдается увеличение глубины проплавления основного металла на 30...35 % (рис. 4 и 6). Компенсировать нежелательное при наплавке увеличение глубины проплавления по сечению валика позволяет компонента МП  $B_z$  при значении ее индукции от 40 мТл и выше.

Таким образом, предложенная в работе комбинация МП при установленных расчетно-экспериментальных путем оптимальных параметрах индукции каждой из составляющих этих полей позволяет значительно расширить возможности управления формой и размерами зоны проплавления основного металла при дуговой наплавке, уменьшить долю участия основного металла в наплавленном.

## Выводы

1. Предложенная в работе комбинация МП позволяет более эффективно, чем при использовании одного продольного МП, управлять геометрическими размерами сечения наплавляемого валика.
2. Предложенные методика и уравнения для расчетов размеров сечения валиков при наплавке с воздействием КМП в зависимости от индукции составляющих этого комбинированного МП обеспечивают хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных.
3. При оптимальных параметрах КМП можно в 1,6...1,8 раза уменьшить долю основного металла в наплавленном, что может служить основанием к разработке новых ресурсосберегающих технологий наплавки.

1. *Сварка с электромагнитным перемешиванием* / В. П. Черныш, В. Д. Кузнецов, А. Н. Бриксман, Г. М. Шеленков. — Киев: Техніка, 1983. — 127 с.
2. *Будник Н. М., Кулагин А. П.* Форма дуги между угольными электродами в продольном магнитном поле // *Автомат. сварка.* — 1979. — № 3. — С. 59–60.
3. *Брижнев В. А., Болдырев А. М.* О влиянии продольного магнитного поля на сварочную дугу прямой полярности // *Там же.* — 1982. — № 1. — С. 15–19.
4. *Размышляев А. Д.* Магнитное управление формированием швов при дуговой сварке. — Мариуполь: ПГТУ, 2000. — 245 с.
5. *Новик Ф. С., Арсов Я. Б.* Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. — М.: Машиностроение; София: Техника, 1980. — 304 с.

It is suggested that a combination of three magnetic fields be applied to widen the possibilities of controlling the shape and size of the penetration zone in submerged-arc wire hard-facing. Mathematical models establishing relationship between induction of components of the combined magnetic field (CMF) and cross-section size of the deposited beads were developed by employing the experimental design and regression analysis methods. The software was developed for computation and optimisation of parameters of the arc hard-facing process in CMF by using a friendly interface, and the extent of impact by induction of the components, as well as a combination of these components of the magnetic fields, on cross-section sizes of the deposited beads is shown.

Поступила в редакцию 30.06.2008