

Т.В. Ольшанская
T.V. Olshanskaya

Пермский государственный технический университет
Perm State Technical University

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ СВАРКИ НА СВОЙСТВА ЗТВ
С ПОМОЩЬЮ ПЛАНИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА
РЕГРЕССИОННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ**

**RESEARCH OF INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL
PARAMETERS OF WELDING ON PROPERTIES ZTI
BY MEANS OF PLANNING AND THE ANALYSIS
REGRESSION EXPERIMENTS**

Рассмотрено применение планирования эксперимента и статистической обработки экспериментальных данных для исследования влияния параметров режима сварки на уровень механических свойств и их неоднородность в зоне термического влияния сварных соединений из низколегированной стали 16Г2АФ. Составлена матрица планирования эксперимента, представлен порядок определения коэффициентов уравнения регрессии. Проведен анализ полученных зависимостей. Определены основные критерии выбора режимов полуавтоматической сварки в среде углекислого газа, при которых наблюдается наименьшая неоднородность свойств в зоне термического влияния.

Ключевые слова: статистическая обработка экспериментальных данных, матрица планирования эксперимента, уравнения регрессии, критерии выбора, зона термического влияния, сварное соединение, механические свойства.

Application planning of experiment and statistical processing of experimental data for research of influence of parameters of a mode of welding on a level of mechanical properties and their heterogeneity in a zone of thermal influence of welded connections from низколегированной steel 16Г2АФ is considered. The matrix of planning of experiment is made, the order of definition of factors of the equation of regress is presented. The analysis of the received dependences is lead. The basic criteria of a choice of modes of semi-automatic welding in the environment of carbonic gas are certain, at which least heterogeneity of properties in a zone of thermal influence.

Keywords: statistical processing of experimental data, matrix of planning of experiment, equations of regress, criteria of a choice, zone of thermal influence, welded connection, mechanical properties.

Появление случайных результатов при проведении экспериментальных работ связано либо со случайной природой самого исследуемого явления, либо с различными случайными воздействиями, которые невозможно контролировать. Математическая статистика позволяет обработать результаты

измерений массовых случайных явлений, обладающих статистической устойчивостью, и выявить эту закономерность. При исследовании многоплановых технологических процессов статистическая обработка экспериментальных данных позволяет выявить основные зависимости между параметрами технологического процесса и свойствами исследуемого объекта. Как правило, технологические исследования трудоемки и связаны со значительными энергетическими и материальными затратами, поэтому одной из важнейших задач исследователя является достижение искомого результата оптимальным образом. Планирование эксперимента при выборе наиболее приемлемого плана позволяет сократить объем экспериментальных данных и произвести оптимизацию параметров технологического процесса [1].

Процесс сварки является сложным и многоплановым технологическим процессом, подверженным влиянию различных помех. Одной из основных целей этого процесса является не только получение монолитного бездефектного соединения, но и получение равнопрочного соединения, имеющего свойства, близкие к свойствам основного материала. Для реализации данных задач необходимо учитывать большое количество входящих факторов, таких как параметры режима сварки, применяемые сварочные материалы, предшествующая или последующая термическая обработка сварного соединения и т.д. Стабилизация условий проведения опытов при сварке часто является невыполнимой задачей, поэтому традиционная схема исследований в таких условиях становится малоэффективной. Кроме того, совокупное действие отдельных факторов не всегда равно простой их сумме из-за явления взаимодействия факторов [2].

Планирование эксперимента и статистическая обработка экспериментальных данных были применены для исследования влияния параметров режима сварки на уровень механических свойств и их неоднородность в зоне термического влияния сварных соединений из низколегированных сталей. Данные стали обладают благоприятной свариваемостью. Однако при подборе технологических параметров сварки низколегированных сталей необходимо учитывать, что в зависимости от уровня погонной энергии в зоне термического влияния вероятно как образование холодных трещин, возможность охрупчивания, так и разупрочнение (и как следствие – ухудшение вязкости и других механических свойств по сравнению с основным металлом). Также неоднородность структур в зоне термического влияния приводит к неоднородности свойств, и на данном локальном участке при работе сварной конструкции под напряжением увеличивается вероятность преждевременного разрушения по сравнению с основным металлом.

Структурные изменения в зоне термического влияния, их полнота напрямую зависит от термического цикла, которому подвергается основной металл околосшовной зоны при сварке. Термический цикл чаще всего характеризуют скоростью нагрева до определенной температуры, временем пребывания

ния металла выше критических точек A_{c_3} и A_{c_1} и скоростью охлаждения. Управлять термическим циклом сварки можно изменяя параметры режима процесса.

Для выявления зависимости между параметрами сварки и механическими свойствами зоны термического влияния и их уровнем неоднородности была составлена матрица ротатабельного планирования второго порядка с тремя факторами. Данная матрица позволяет получить информацию о влиянии каждого фактора на изучаемую величину, о совместном влиянии взаимодействия факторов, а также позволяет уменьшить количество опытов по сравнению с матрицей полного факторного эксперимента. При составлении матрицы учитывалось: число факторов $k = 3$, ядро плана 2^3 , число точек ядра $n_{я} = 8$, число звездных точек $n_{\alpha} = 6$, число нулевых точек $n_0 = 6$, величина звездного плеча $\alpha = 1,667$, общее число опытов $N = 20$. В качестве основных входящих параметров были выбраны:

1) фактор X_1 – сила тока сварки (основной уровень – 150 А, интервал варьирования 25 А);

2) фактор X_2 – скорость сварки (основной уровень – 15 м/ч, интервал варьирования 3 м/ч);

3) фактор X_3 – температура предварительного подогрева перед сваркой (основной уровень – 120 °С, интервал варьирования 60 °С).

Свариваемый материал – сталь 16Г2АФ, способ сварки – полуавтоматическая в среде углекислого газа, присадочный материал – проволока Св-08Г2С.

В качестве критерия для определения механических свойств и уровня их неоднородности в зоне термического влияния для полученных сварных соединений была выбрана микротвердость. Ввиду того, что зона термического влияния имеет малую протяженность (от 0,9 мм до 0,5 мм при разных режимах сварки), определение механических свойств, таких как ударная вязкость, прочность при растяжении и т.д., связано с рядом трудностей. Измерение же микротвердости позволяет получить достаточно большое количество опытных данных, необходимых для статистического анализа. Микротвердость измерялась в околосшовной зоне, испытывающей в процессе сварки нагрев выше критической точки A_{c_3} , т.е. на участке, где происходит полная фазовая перекристаллизация. Измерения проводились на поперечных микрошлифах, вырезанных из сваренных образцов, количество измерений более 60 для каждого режима.

Для определения уровня механических свойств в зоне термического влияния в качестве первого выходного параметра (Y_1) было выбрано среднее значение микротвердости. Среднее значение характеризует центр распределения вероятностей, т.е. это наиболее часто встречающееся значение величины микротвердости. Для определения степени неоднородности механических свойств в качестве второго выходного параметра (Y_2) было выбрано среднее квадратич-

ное отклонение микротвердости. Среднее квадратичное отклонение представляет собой стандартное отклонение случайной величины и поэтому может хорошо характеризовать неоднородность распределения микротвердости в ЗТВ.

После проведения статистической обработки опытных данных измерения микротвердости производился расчет уравнений регрессии.

Для матрицы ротатабельного планирования второго порядка с тремя факторами уравнение регрессии можно представить следующим образом:

$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_3X_3 + B_4X_1X_2 + B_5X_2X_3 + B_6X_1X_3 + B_7X_1^2 + B_8X_2^2 + B_9X_3^2.$$

Вычисление коэффициентов уравнения регрессии производилось в матричной форме с помощью программного пакета Mathcad.

$$B = (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot Y,$$

где X^T – матрица трансформированная по отношению к матрице X ; $(X^T \cdot X)^{-1}$ – обратная матрица по отношению к матрице $(X^T \cdot X)$.

Вычислив коэффициенты уравнения регрессии, необходимо определить их доверительные интервалы. Для этого определяется дисперсия параметров оптимизации по результатам опытов в центре плана S_Y^2 , дисперсии коэффициентов уравнения регрессии S_B^2 и диагональный элемент $C_{i,i}$ матрицы по следующим формулам:

$$S_Y^2 = \frac{\sum_{u=1}^{n_0} (Y_u - Y_S)^2}{n_0 - 1}, \quad Y_S = \frac{1}{n_0} \sum_{n=N-n}^N Y_n, \quad S_B^2 = C_{i,i} S_Y^2, \quad C_{i,i} = (X^T \cdot X)^{-1},$$

где Y_u – значение параметра оптимизации в u -м опыте; Y_S – значение параметра оптимизации в n_0 опытах.

Доверительные интервалы коэффициентов уравнения регрессии определялись из выражения $dB = t \sqrt{S_B^2}$. Если коэффициент уравнения регрессии B_i по абсолютному значению меньше dB_i , то коэффициент считается незначимым. Исключив из уравнения регрессии статистически незначимые коэффициенты, получили математическую модель. Адекватность полученной модели проверялась с помощью расчетного критерия Фишера (F-критерия):

$$F_p = \frac{S_{ад}^2}{S_Y^2}.$$

В результате расчетов были получены следующие уравнения регрессии:

$$Y_1 = 3722 - 213,3 \cdot X_1 - 229,2 \cdot X_3 - 120,5 \cdot (X_3)^2 + 169,5 \cdot (X_1 \cdot X_3), \quad (1)$$

$$Y_2 = 544,3 + 44,06 \cdot X_2 - 34,8 \cdot X_3 + 76,38 \cdot (X_1)^2 - 56,25 \cdot (X_1 \cdot X_3). \quad (2)$$

Уравнение регрессии (1) описывает изменение среднего значения микротвердости в зоне термического влияния в зависимости от параметров сварки, а уравнение (2) – уровень неоднородности микротвердости. Из уравнения регрессии (1) видно, что на уровень механических свойств наиболее существенное влияние оказывает 1-й фактор (сила тока при сварке) и 3-й (температура предварительного подогрева). На уровень неоднородности механических свойств наиболее сильно будет влиять скорость сварки (второй фактор) и температура предварительного подогрева, сила тока оказывает второстепенное влияние. По уравнениям (1) и (2) были построены графические зависимости, проведен анализ полученных результатов.

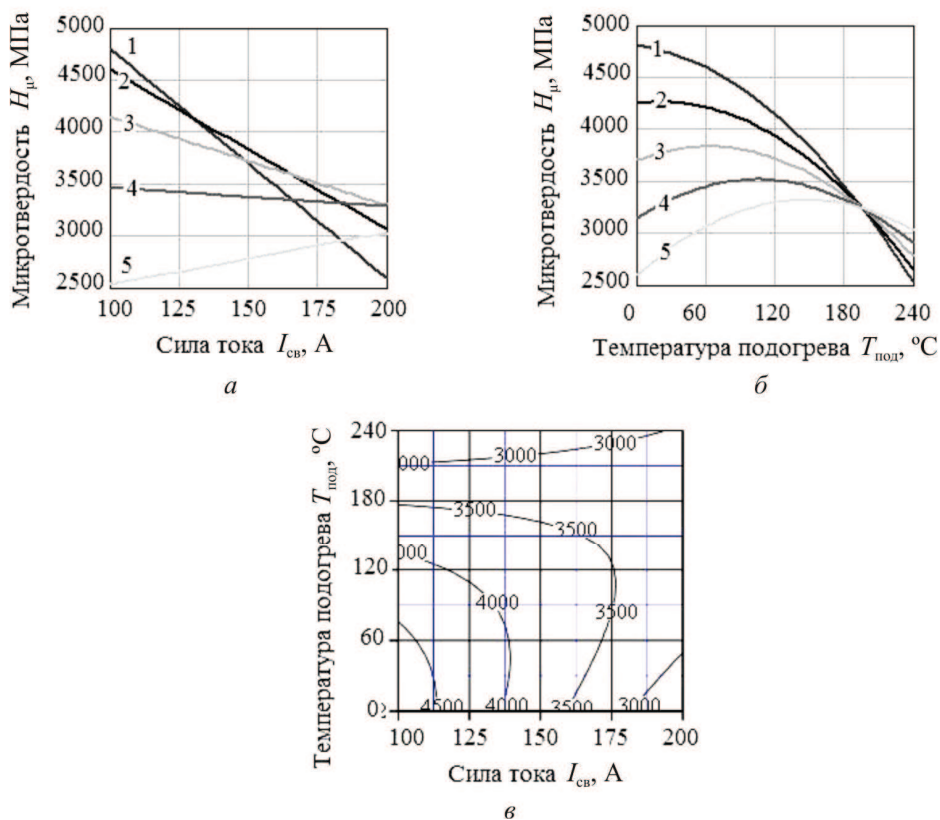


Рис. 1. Изменение среднего значения микротвердости: *a* – влияние силы тока $I_{св}$ при постоянной температуре подогрева: 1 – 0 °С, 2 – 60 °С, 3 – 120 °С, 4 – 180 °С, 5 – 240 °С; влияние температуры подогрева $T_{под}$ при постоянной силе тока: 1 – 100 А, 2 – 125, 3 – 150 А, 4 – 175 А, 5 – 200 А; *в* – совместное влияние силы тока и температуры подогрева

Исследования показали, что увеличение силы тока приводит к уменьшению среднего значения микротвердости в зоне термического влияния, если сварка ведется без предварительного подогрева или с подогревом при температуре, не превышающей 180 °С (рис. 1, *а*). Если сварка проводится с предварительным подогревом при температуре выше 200 °С, то увеличение силы тока приводит к снижению среднего значения микротвердости в зоне термического влияния.

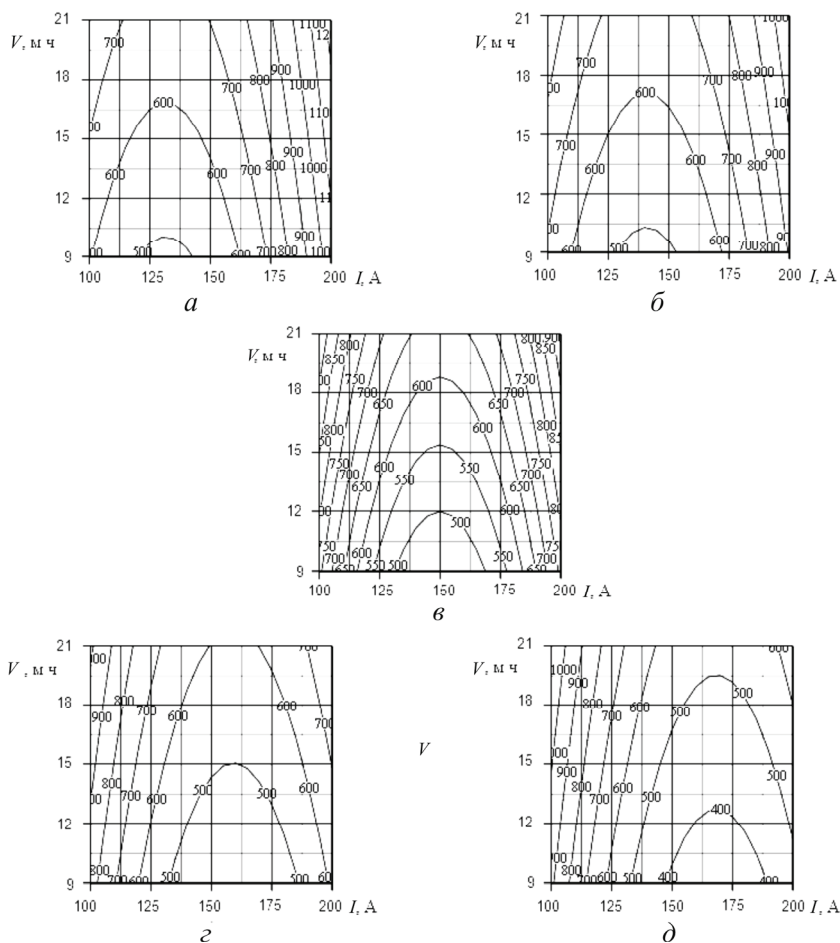


Рис. 2. Влияние силы тока I и скорости сварки V на изменение относительной площади неметаллических включений при постоянной температуре подогрева: *а* – 0 °С; *б* – 60 °С; *в* – 120 °С; *г* – 180 °С; *д* – 240 °С

Также следует отметить, что увеличение температуры подогрева приводит к снижению среднего значения микротвердости, если сварка проводится при силе тока не более 120 А (рис. 1, *б*). При сварке на больших значениях

силы тока повышение температуры предварительного подогрева приводит сначала к повышению среднего значения микротвердости, а затем – к понижению, т.е. на кривой зависимости есть максимум. И чем выше значение силы тока, тем к более высоким температурам подогрева сдвигается максимум. На рис. 1, в показано совместное влияние силы тока и температуры предварительного подогрева на изменение среднего значения микротвердости в околошовной зоне. Наиболее высокое значение микротвердости получается при сварке на низких токах и низкой температуре подогрева.

Влияние параметров режима сварки на неоднородность микротвердости в зоне термического влияния показано на рис. 2. Увеличение скорости сварки приводит к увеличению среднего квадратичного отклонения микротвердости, и это наблюдается практически при всех рассмотренных значениях силы тока и температуры предварительного подогрева. Увеличение силы тока ведет сначала к снижению среднего квадратичного отклонения микротвердости, а затем к его повышению. При каких значениях силы тока будет наблюдаться минимальный разброс микротвердости, зависит от температуры предварительного подогрева. Повышение температуры подогрева приводит к тому, что минимальный разброс твердости наблюдается при сварке с силой тока от 130 А до 170 А. Повышение температуры предварительного подогрева также приводит к снижению численного значения среднего квадратичного отклонения микротвердости.

Таким образом, проведенный анализ показал, что при выборе параметров режимов полуавтоматической сварки в среде углекислого газа стали 16Г2АФ для получения оптимального сочетания уровня твердости и однородности необходимо в первую очередь выбирать параметры силы тока, а в соответствии с ними – температуру предварительного подогрева и скорость сварки.

Список литературы

1. Новиков Ф.С. Математические методы планирования экспериментов в металловедении. – М.: Изд-во Моск. ин-та стали и сплавов, 1970. – 79 с.
2. Язовских В.М. Математическое моделирование и инженерные методы расчета в сварке: в 2 ч. Ч. 1. Статистическая обработка и планирование эксперимента: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2007. – 127 с.

Получено 18.02.2011