

тора 11. Синхронизатор, управляемый напряжением сварочного трансформатора, выдает сигналы положительной полярности на схему совпадений. Если сварка была качественной, т. е. в процессе сварки отмечалось сближение электродов под током и их раздвигание в результате расширения металла при образовании литого ядра, то на время контроля на схему совпадений с разделительного фильтра поступают сигналы положительной полярности и сигналом на выходе схемы, модулированным модулятором, зажигается световой индикатор 13.

Результаты контроля качества каждого одноточечного соединения при их групповой сварке обобщаются схемой 14, сигнал от которой поступает на исполнительный механизм, связанный со сварочной машиной. Если все соединения данной группы сварены качественно, то схема управления разрешает сварку последующей группы (последующего изделия). В противном случае она выдает сигнал на отбраковку сваренного изделия и запрещает сварку последующих.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Балковец Д. С., Григорьев В. А. Способ контроля процесса точечной сварки. Авторское свидетельство СССР, № 74264.
2. Балковец Д. С. Технологические основы образования литой зоны сварного точечного соединения. Докторская диссертация. 1953.
3. Митропольский А. К. Техника статистических вычислений. «Физматгиз», 1961.
4. Рудман М. Д., Ивашин А. С., Курзин В. А. Устройства для определения качества сварного соединения по скорости теплового расширения металла. Авторское свидетельство СССР № 383555. Класс В23К—11/24. (№ 333812/25 — 27). Бюллетень № 24, 1973.

И. С. Гришин, Ю. Н. Копылов, В. А. Медников

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИФфуЗИОННОЙ СВАРКИ

Математическое моделирование сварочных процессов является перспективным направлением исследований, позволяющим перейти от традиционных методов однофакторного эксперимента к экспериментам многофакторным [1]. При этом существенно снижается трудоемкость исследований, направленных на изыскание оптимальных параметров процесса, расширяется информация о взаимосвязи всего комплекса технологических параметров с характеристиками получаемых соединений.

Для описания технологических процессов обычно применяется локально-интегральная (полиномиальная) модель [2], улучшение аппроксимации которой может быть достигнуто повышением порядка полинома. Аппроксимирующая функция остается при этом линейной по своим параметрам, что облегчает необходимые

статистические процедуры (применение метода наименьших квадратов и т. д.).

Диффузионная сварка в вакууме (ДСВ) позволяет получить высокопрочные соединения разнообразных материалов при минимальной пластической деформации деталей [3]. Показательно, что во многих случаях (штамповое, электровакуумное производство) допустимая остаточная деформация сварных конструкций особенно жестко регламентируется. Поэтому за критерии оптимизации процесса ДСВ могут быть приняты прочность соединения на отрыв (кг) и его остаточная деформация ( $\epsilon\%$ ). Задачей математического моделирования становится выявление технологических режимов сварки, обеспечивающих требуемую прочность (зависимая переменная  $y_1$ ) при минимальной деформации соединения (зависимая переменная  $y_2$ ).

В настоящей работе проводилось математическое моделирование процесса диффузионной сварки сплава ВК15 с химически никелированной сталью 45 с целью разработки промышленной технологии армирования твердым сплавом стальных штампов.

Для решения уравнения регрессии, представленного в общем виде

$$y = b_0 + \sum_i^k b_i x_i + \sum_{i,j}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_i^k b_{ii} x_i^2 + \dots \quad (1)$$

( $b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii}$  — коэффициенты регрессии;  $k$  — количество независимых переменных), необходимо определить число независимых переменных и интервалы их варьирования, вычислить коэффициенты регрессии по результатам многофакторного эксперимента, проверить его на адекватность.

При диффузионной сварке определяющее влияние на ход процесса оказывают температура ( $T^\circ\text{C}$ ), удельное давление сжатия деталей ( $P_{\text{св}} \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$ ) и время изотермической выдержки под давлением ( $\tau$  мин). Опыт показал, что остальные параметры (способ и класс обработки соединяемых поверхностей, глубина вакуума при сварке) не столь существенно влияют на характеристики соединения и могут быть зафиксированы на определенном уровне.

Таким образом, в качестве независимых переменных уравнений регрессии могут быть использованы температура ( $x_1$ ), давление ( $x_2$ ), время ( $x_3$ ). Интервал их варьирования выбирается на основании сложившихся теоретических представлений о процессе ДСВ и анализа физико-механических характеристик конкретных соединяемых материалов.

В табл. 1 приведены также уровни варьирования независимых переменных.

Столь широкий интервал варьирования переменных выбран для получения по возможности более полной информации о поведении системы, несмотря на возможное усложнение ее математического описания.

Переменные	Интервал варьирования	Основной уровень	Верхний уровень	Нижний уровень
$X_1$	200	900	1100	700
$X_2$	0,75	1,25	2	0,5
$X_3$	7,5	12,5	20	5

Первоначально модель процесса была представлена в виде линейной зависимости и в качестве плана выбран полный факторный эксперимент для трех независимых переменных, варьируемых на двух уровнях («+» верхнем и «-» нижнем). Результаты проведенного многофакторного эксперимента из 8 опытов приведены в табл. 2.

Таблица 2

№ п.п.	Матрица планирования								Результаты опытов	
	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1x_2x_3$	Р отр., кг	Е, %
									$y_1$	$y_2$
1	+	-	-	-	+	+	+	-	200	0,040
2	+	+	-	-	-	-	+	+	5300	0,060
3	+	-	+	-	-	+	-	+	650	0,090
4	+	+	+	-	+	-	-	-	6000	2,600
5	+	-	-	+	+	-	-	+	370	0,060
6	+	+	-	+	-	+	-	-	6070	0,800
7	+	-	+	+	-	-	+	-	1250	0,110
8	+	+	+	+	+	+	+	+	7260	4,100

Примечание. 1. Подготовка поверхности: твердый сплав — шлифовальные  $\Delta 8$ — $\Delta 9$ ; сталь 45 — токарная обработка  $\Delta 7$ , химическое никелирование слоем 25 мкм.

Сварка в вакууме  $2 \cdot 10^{-5}$  мм рт.ст.

Проведенные опыты позволяют вычислить коэффициенты регрессии по уравнению

$$b_i = \frac{\sum_{a=1}^N x_{ia} \cdot x_a}{N} \quad (2)$$

( $N$  — число опытов) и построить линейные математические модели для определения усилия разрыва образцов ( $y_1$ ) и остаточной деформации ( $y_2$ )

$$y_1 = 3520 + 2770x_1 + 402x_2 + 350x_3 + 70x_{12} - 445x_{13} + 115x_{23} + 5x_{123} \quad (3)$$

$$y_{ik} = 0,975 + 0,907x_1 + 0,742x_2 + 0,285x_3 + 0,717x_{12} + 0,275x_{13} + \\ + 0,218x_{23} + 0,082x_{123}, \quad (4)$$

где  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_{12}, x_{13}, \dots, x_{123}$  — условные переменные, связанные с натуральными переменными  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_1$ ,

$$x_i = \frac{X_i - X_{0i}}{\Delta X_i},$$

где  $X_{0i}$  — основной уровень  $i$  — переменный.

$\Delta X_i$  — интервал варьирования  $i$  — переменный.

Оценка значимости коэффициентов регрессии выполнялась по критерию Стьюдента [4]:

$$t_{ij} = \frac{b_{ij} \sqrt{N}}{S_{(4)}},$$

где  $N$  — количество экспериментов;  $S_{(4)}$  — ошибка эксперимента.

Если в приведенных уравнениях хотя бы один из коэффициентов регрессии при парном взаимодействии существенно отличен от нуля ( $b_{ij} \neq 0$ ), то линейные уравнения не являются адекватными исследуемому процессу. Адекватность уравнений (3) и (4) по данным эксперимента проверялась также по критерию Фишера для уровня значимости 0,05 [4]. Проверка показала, что приведенные линейные уравнения не описывают изучаемый процесс и необходимо перейти к математической модели с полиномами более высокого порядка. С этой целью построен и реализован план многофакторного эксперимента 2-го порядка для  $K=3$  (табл. 3).

Для планов такого рода может быть выполнено обращение матриц планирования, составленных из коэффициентов нормальных уравнений [5]. Определение коэффициентов регрессии сводится к вычислению сумм ( $oy, iy, i_jy, \text{ и } iijy$ ):

$$b_0 = 0,166338 (oy) - 0,056791 \sum_{i=1}^k (i iy), \quad (5)$$

$$b_i = 0,073224 (iy), \quad (6)$$

$$b_{ii} = 0,062500 (i iy) + 0,006889 \sum_{i=1}^k (i iy) - 0,056791 (oy), \quad (7)$$

$$b_{ij} = 0,125000 (i_jy), \quad (8)$$

$$\text{где } (oy) = \sum_u y_u; \quad (i iy) = \sum_u x_{iu}^2 y_u$$

$$(i iy) = \sum_u x_{iu} \cdot y_u; \quad (i_jy) = \sum_u x_{iu} \cdot x_{ju} \cdot y_u.$$

По этим зависимостям на ЭЦВМ вычислялись коэффициенты регрессии и составлялись уравнения второго порядка. Проверка на адекватность показала, что уравнение второго порядка удов-

№ п.п.	Матрица планирования			Результаты опытов	
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	P, отр. кг	E, %
1	-1	-1	-1	1570	0,04
2	1	-1	-1	5320	0,06
3	-1	1	-1	2440	0,09
4	1	1	-1	6080	2,60
5	-1	-1	1	2740	0,06
6	1	-1	1	5720	0,80
7	-1	1	1	1830	0,11
8	1	1	1	6760	4,10
9	-1,682	0	0	1010	0,06
10	1,682	0	0	6580	4,60
11	0	-1,682	0	3640	0,01
12	0	1,682	0	5370	1,00
13	0	0	-1,682	4310	0,02
14	0	0	1,682	5260	0,30
15	0	0	0	4870	0,225
16	0	0	0	5020	0,215
17	0	0	0	4880	0,200
18	0	0	0	4910	0,205
19	0	0	0	4900	0,210
20	0	0	0	5060	0,230

летворительно описывает изменение прочности соединения твердого сплава со сталью в зависимости от выбранных независимых переменных

$$y_1 = 4900 + 2985x_1 - 1170x_1^2 + 810x_2 - 310x_2^2 + 350x_3. \quad (9)$$

Однако второе аналогичное уравнение (уравнение изменения деформации деталей в зависимости от тех же параметров) не оказалось адекватным. Это привело к необходимости составить уравнение третьего порядка.

Для составления уравнения использован принцип наименьших квадратов [5]. С этой целью для соотношения

$$S = \sum [y_i - f(x_i)]^2,$$

в котором функция  $f(x_i)$  записана со всеми неопределенными коэффициентами  $a, b, c$  и т. д., необходимо определить значения коэффициентов, обеспечивающих минимальную сумму ( $S$ ) в уравнении.

Для вычисления этих коэффициентов составляли систему из восьми уравнений, которые решались итерационным методом на вычислительной машине «Одга-1013». Полученные коэффициенты проверяли на значимость в пределах доверительных границ, а составленное уравнение третьего порядка — на адекватность. Проверка показала, что уравнение

$$y_2 = 0,232 + 0,0126x_1^3 + 0,00563x_2^3 - 0,0334x_3^2 + 0,0093x_1^2x_2^2 - \\ - 0,00027x_1^3x_2^2 - 0,00303x_2^3x_3^2 + 0,00005x_1^3x_2^3. \quad (10)$$

адекватно описывает изменение пластической деформации стали при ДСВ с твердым сплавом.

В уравнениях (9) (10) условные переменные  $x_1$   $x_2$   $x_3$  связаны с натуральными переменными  $x_1$   $x_2$   $x_3$  формулами переходного вида:

$$x_1 = \frac{T - T_n}{\Delta T}; \quad x_2 = \frac{P - P_0}{\Delta P}; \quad x_3 = \frac{\tau - \tau_0}{\Delta \tau}.$$

Таким образом, полученные зависимости (9) (10) могут быть приняты за математическую модель процесса ДСВ рассматриваемого сочетания материалов. Решение этих уравнений проведено на ЭВМ.

В табличной форме получены значения прочности соединения и сопутствующей остаточной деформации в зависимости от температуры процесса и давления сжатия для шести фиксированных значений времени сварки (в выбранном интервале варьирования  $\tau$ ).

Такая форма вычислений целесообразна в связи с тем, что анализ уравнений показал наибольшую значимость температуры и наименьшую времени из трех изучаемых параметров процесса.

Результаты решения уравнений (9) (10) можно представить и в форме номограмм, что более удобно для анализа и практического использования.

При построении двухмерных сечений поверхности отклика (при фиксированном  $\tau_{св}$ ) на координатную сетку  $P_{сн} - T_{сн}$  наносятся линии, соответствующие определенной прочности соединения и его остаточной деформации (рис. 1). Номограмма свидетельствует, что на практике определенное значение прочности соединения может быть получено при различных значениях  $P_{сн}$   $T_{сн}$  и, как следствие, с различной остаточной деформацией. Поэтому при ДСВ понятие оптимизации режима следует рассматривать как задачу получения прочности, необходимой и достаточной для конкретной конструкции при минимальной макропластической деформации деталей. Строгое решение этой задачи с применением однофакторного эксперимента исключительно трудоемко.

В приведенной номограмме путем графического построения (линии I—II) легко выявить режимы, обеспечивающие минимальную деформацию при каждом значении прочности соединения.

Зона, выделенная пунктиром по обе стороны от этой кривой, соответствует пятипроцентному допуску на изменение величины остаточной деформации. Показательно, что с ростом прочности эта зона сужается, т. е. чем выше требуемая прочность соединения, тем меньше допустимые колебания значений параметров процесса.

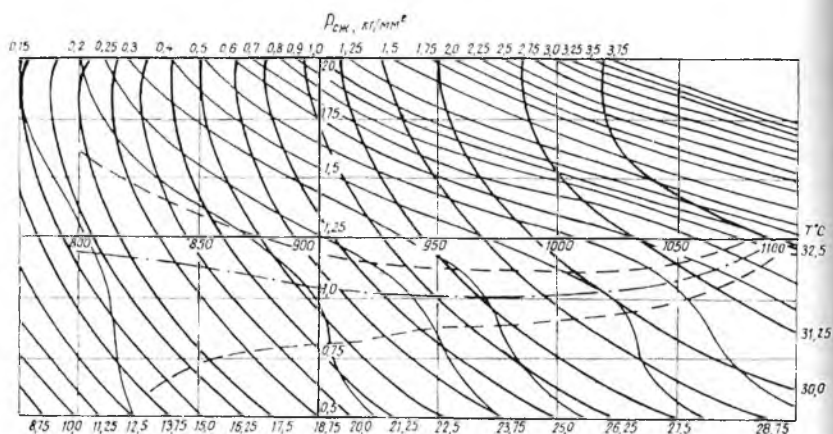


Рис. 1. Номограмма двухмерного сечения поверхности отклика

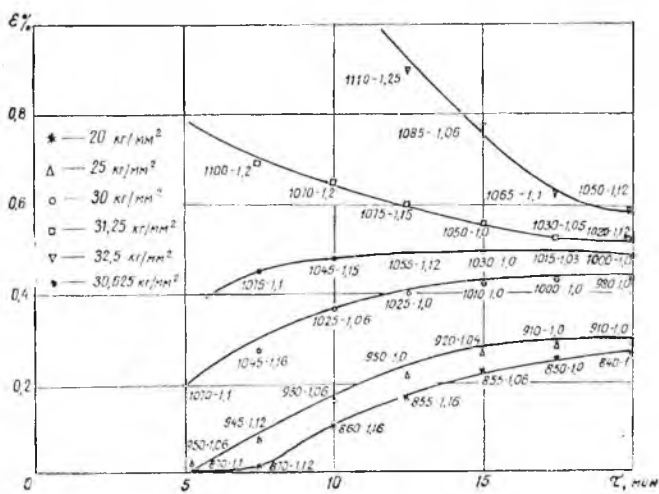


Рис. 2. Кинетические зависимости измерения остаточной деформации для фиксированных значений прочности

Из номограмм, аналогичных приведенной и построенных для различного времени сварки, можно получить еще более удобные для практиков кинетические зависимости (рис. 2).

Каждая кривая на рисунке соответствует определенному уровню прочности соединения. Точки на кривых являются конкретными значениями температуры и давления, при которых эта прочность достигнута. Приведенные графические зависимости связывают все основные параметры процесса (температура — давление — время) с прочностью и деформацией получаемых соединений. Поэтому технолог, зная требования, предъявляемые к свариваемой конструкции по прочности и допустимой деформации, по графикам на рис. 2 может выбрать конкретный режим сварки. Например, нужно сварить штамп, в котором прочность соединения армирующего элемента (твердого сплава) с основанием (сталью) должна соответствовать  $30 \text{ кг/мм}^2$ , а изменение диаметра основания после сварки не превышать  $0,4\%$ . В соответствии с графиками этим условиям отвечает следующий режим ДСВ:  $T_{\text{св}} = 1025^\circ\text{C}$ ;  $P_{\text{св}} = 1,06 \text{ кг/мм}^2$ ,  $\tau_{\text{св}} = 10 \text{ мин}$ .

Показательно, что для получения соединений с малой остаточной деформацией не обязательно стремиться к минимальному времени сварки, а увеличение длительности процесса во многих случаях способствует завершению всех его стадий и, прежде всего, стадии диффузионного объемного взаимодействия [6].

В заключение следует отметить, что необходимо накопить опыт и статистический материал по решению подобных задач для целого ряда композиций, соединяемых ДСВ. Вероятно, в дальнейшем эти данные могут стать основой для построения обобщенной математической модели процесса диффузионной сварки в вакууме.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Патон Б. Е. и др. Автоматизация экспериментальных исследований сварочных процессов. «Автоматическая сварка», 1970. № 6, стр. 1—6.
2. Налимов В. В. Теория эксперимента. М., «Наука», 1971
3. Казаков П. Ф. Диффузионная сварка в вакууме. М., «Машиностроение», 1968.
4. Пустыльник Е. И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. М., «Наука», 1968.
5. Налимов В. В., Чернова Н. А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. М., «Наука», 1965.
6. Копылов Ю. Н., Конюшков Г. В., Гришин И. С. Кинетика диффузионной сварки электровакуумных металлических материалов. «Электронная техника». 1972, серия 7, вып. 3, стр. 22—34.