

Общий подход к расчету тепловых режимов при плазменном формообразовании.

Соколов Ю.В.¹, Садоха М.А.²

¹Белорусский национальный технический университет

²Республиканское научно-производственное унитарное предприятие «ИНСТИТУТ БЕЛНИИЛИТ»

Минск, Беларусь

Плазменное формообразование по сравнению с нанесением защитных, износостойких и иных покрытий на различные поверхности имеет ряд существенных отличий. Так напыленный материал, сформированный в результате плазменного формообразования, имеет значительную толщину, многократно большую по сравнению с защитными и иными покрытиями, и в дальнейшем эксплуатируется без модели (подложки). При этом основные рабочие нагрузки воспринимают именно слои, непосредственно контактирующие в процессе формирования с моделью. В силу вышесказанного требования, предъявляемые к напыленному материалу при плазменном формообразовании, имеют определенные отличия от требований к напыленным покрытиям иного назначения.

Среди основных свойств напыленного материала при плазменном формообразовании, которые главным образом определяют и характеризуют служебные характеристики будущего изделия в целом, следует отметить такие, как плотность, твердость, прочность на растяжение, ударная вязкость, износ, пористость. Другие свойства являются либо существенно менее значимо влияющими на служебные характеристики формируемого изделия, либо, как правило, являются производными от указанных выше свойств.

Проведенные широкомасштабные исследования показывают, что плазменное формообразование является весьма сложным с точки зрения физики, химии, металлургии и теплотехники процессом, характеризующимся множеством факторов. С целью упрощения моделирования и анализа процессов формирования структуры напыленного материала при плазменном формообразовании принимаем, что наиболее значимыми факторами, определяющими

процесс являются следующие: мощность плазменной дуги, температура подложки (модели) (в случае использования предварительно нагретой модели), дистанция напыления и расход порошка. Остальные факторы процесса плазменного формообразования принимаем постоянными, определяемыми техническими возможностями оборудования, используемого при осуществлении процесса.

Рассмотрим общий подход к расчету тепловых режимов при плазменном формообразовании на примере порошка системы NiCuBSi (ПР-НД42СР ТУ 14-1-3997-85). Для напыления использован порошок размером 50-100 мкм после прокаливания при температуре 150-200°C с целью удаления влаги. Напыление осуществляли с использованием универсальной плазменной установки УПУ-3Д в дуге аргоно-аммиачной плазмы с подачей порошка на срез сопла. Мощность дуги регулировали изменением напряжения при постоянной силе тока. Режимы напыления, применяемые при проведении исследований, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Режимы напыления порошка системы NiCuBSi при плазменном формообразовании

Сила тока, А	300
Напряжение, В	66,5; 80,5; 100,0; 116,5
Мощность дуги (соответственно), кВт	20; 25; 30; 35
Расход плазмообразующего газа, м ³ /ч	2,4-3,4
Дистанция напыления, м	0,10-0,14
Температура подложки (модели), °С	30

Оптимизация основных технологических параметров напыления была осуществлена с использованием полного факторного эксперимента (2^3) с учетом всех возможных факторов [1, 2]. При этом в качестве переменных факторов были выбраны: мощность дуги (X_1), дистанция напыления (X_2) и расход порошка (X_3).

Проведенные предварительные исследования и результаты, полученные в ходе их реализации, послужили основой для выбора основных уровней и интервалов варьирования значений факторов (таблица 2).

Таблица 2

Уровни факторов.

Факторы	Мощность дуги, кВт	Дистанция напыления, м	Расход порошка, г/мин
Код	X_1	X_2	X_3
Основной уровень	30	0,12	45
Интервал варьирования	5	0,02	10
Верхний уровень (+)	35	0,14	55
Нижний уровень (-)	25	0,10	35

В качестве параметров оптимизации были приняты: плотность (Y_1), твердость (Y_2), прочность на растяжение (Y_3), ударная вязкость (Y_4), износ (Y_5), пористость (Y_6).

Реализация матрицы планирования (таблица 3) позволила получить адекватные математические модели, которые с учетом статистической значимости коэффициентов регрессии принимают вид:

$$Y_1 = 8,055 + 0,133X_1 - 0,040X_2 + 0,048X_1X_2 + 0,035X_1X_3 - 0,030X_1X_2X_3 \quad (1)$$

$$Y_2 = 23,082 + 0,739X_1 + 0,417X_2X_3 \quad (2)$$

$$Y_3 = 258,626 + 12,181X_1 - 2,985X_2 - 1,765 \cdot X_1X_3 - 1,242X_2X_3 \quad (3)$$

$$Y_4 = 100,542 + 0,791X_1 - 8,292X_2 - 3,042X_1X_3 - 1,292X_1X_3 \quad (4)$$

$$Y_5 = 6,18 \cdot 10^{-3} + 0,55 \cdot 10^{-3}X_1 - 0,40 \cdot 10^{-3}X_2 \quad (5)$$

$$Y_6 = 5,10 - 0,85X_1 + 0,85X_2 - 0,40X_1X_2 - 0,075X_3 + 0,075X_1X_3 + 0,075X_1X_2X_3 \quad (6)$$

Таблица 3

Матрица планирования и результаты экспериментов

Номер опыта	Переменные факторы			Параметры оптимизации*					
	мощность дуги W, кВт	дистанция напыления L, м	расход порошка G, г/мин	Плотность $\gamma \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	Твердость, HRC ₃	Прочность на растяжение, МПа	Ударная вязкость, кДж/м ²	Износ, м	Пористость, %
Код	X_1	X_2	X_3	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6
1	+	+	+	8,20	24	265,1	88	0,0060	4,8
2	-	+	+	7,83	22	244,1	95	0,0052	7,0
3	+	-	+	8,25	24	273,3	115	0,0073	3,7
4	-	-	+	7,95	22	252,8	107	0,0059	4,6
5	+	+	-	8,19	23	270,2	92	0,0065	4,6
6	-	+	-	7,84	22	243,2	94	0,0054	7,4
7	+	-	-	8,11	24	274,6	113	0,0071	3,9
8	-	-	-	8,07	23	245,8	103	0,0060	4,8

* - среднее значение по результатам трех опытов

На основе полученных математических моделей были построены номограммы в координатах X_1 - X_2 при фиксированных значениях X_3 (рисунок 1). Граничные условия для построения номограмм были определены следующими: $Y_1 \geq 8,1 \cdot 10^{-3}$, кг/м³; $Y_2 \geq 23$ HRC₃; $Y_3 \geq 261,5$ МПа; $Y_4 \geq 100$ кДж/м²; $Y_5 \leq 0,0065$ м; $Y_6 \leq 4,9$ %.

Анализ номограмм позволил установить область оптимальных параметров процесса плазменного формообразования с использованием порошка системы NiCuBSi:

Мощность дуги, кВт	31,5-33,0
Дистанция напыления, м	0,11-0,12
Расход порошка, г/мин	39-43

Свойства напыленного материала, полученного в результате плазменного формообразования по оптимальному режиму с использованием порошка системы NiCuBSi, имеют следующие значения:

Плотность $\gamma \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	8,18 · 10 ⁻³
Пористость, %	4,3
Твердость, HRC ₃	25
Износ, м	0,0060
Прочность на растяжение, МПа	268
Ударная вязкость, кДж/м ²	106

Аналогичным образом может быть выполнен расчет тепловых режимов при плазменном формообразовании и с использованием других порошковых материалов.

Литература

1. Новик Ф.С., Арсов Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. - М.: Машиностроение; София: Техника, 1980.
2. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. - М.: Наука, 1976.

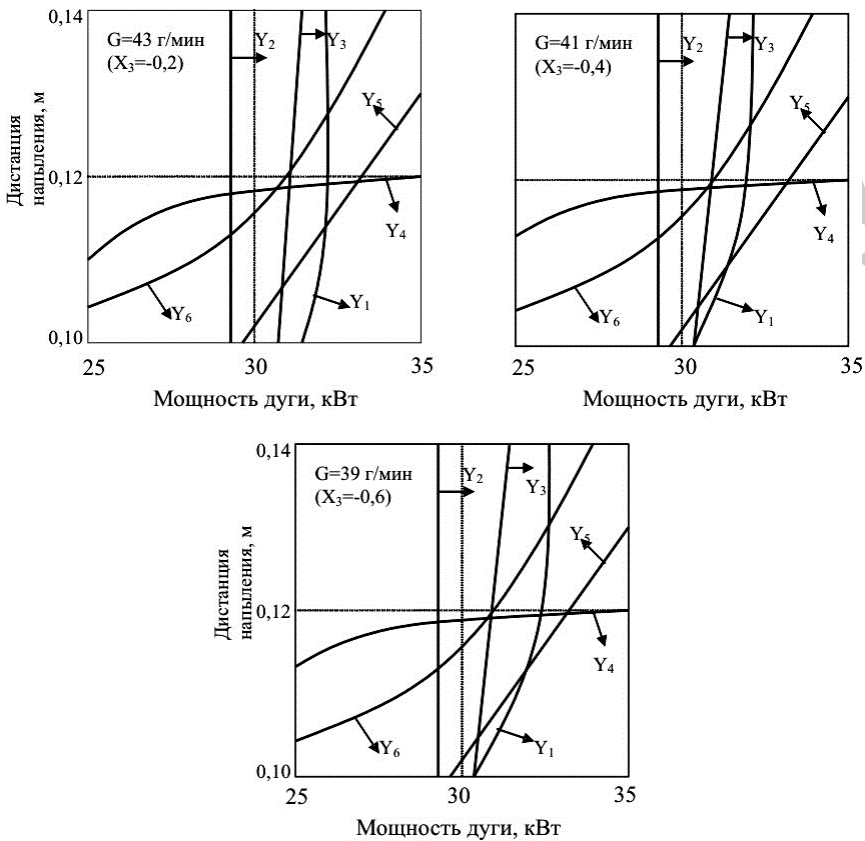


Рис.1. Номограммы для определения оптимальных параметров напыления порошка системы NiCuBSi