

мендовать выпуск установок со стабильным регулированием распределения энергии по лучу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кардаполова М.А., Спиридонов Н.В. Применение лазерной обработки для оплавления покрытий из никелевых самофлюсующихся сплавов // Композиц. покрытия. – Житомир, 1985. – С. 55–56. 2. Рихтмайер Р., Мортон К. Разносторонние методы решения краевых задач. – М., 1972. – 418 с. 3. Самарский А.А., Моисеенко Б.Д. Экономичная схема складного счета для многомерной задачи Стефана // Вычисл. математика и математич. физика. – 1965. – Т. 5, № 5. – С. 816–827.

УДК 621.793

Б.А. КАЛЕДИН

ВЫБОР УПРАВЛЯЕМЫХ ФАКТОРОВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПРОЦЕССОВ НАПЫЛЕНИЯ МЕТОДОМ АПРИОРНОГО РАНЖИРОВАНИЯ

Процесс нанесения покрытий на изделия – многостадийный, определяется большим числом факторов (по некоторым данным, от 30 до 60). Поэтому возникает задача выделить из них наиболее существенные и управляемые для проведения, например, активного эксперимента. Для решения этой задачи может быть использован метод априорного ранжирования, который позволяет путем целенаправленного опроса специалистов и соответствующей обработки результатов этого опроса определить роль и место каждого из исследуемых факторов [1].

Рассмотрим применение этого метода на следующем примере. Требовалось выделить наиболее значимые факторы при исследовании процесса нанесения покрытия на стальную компактную основу. В качестве определяющего параметра оптимизации была выбрана прочность сцепления покрытия с основой $\sigma_{\text{в}}$. Изучались следующие факторы: метод нанесения покрытия (x_1), конструкция горелки или плазмотрона (x_2), размеры частиц напыляемого порошка (x_3), форма частиц порошка (x_4), исходная плотность порошка (x_5), температура нагрева частиц порошка (x_6), давление сжатого воздуха (x_7), температура подогрева основы (подложки) (x_8), подача плазмотрона или горелки (x_9), расстояние от них до подложки (x_{10}), материал подложки (x_{11}), материал порошка (x_{12}), исходная обработка поверхности (x_{13}), толщина покрытия (x_{14}).

Эти факторы оценивались двумя группами специалистов: в первой группе было 7, а во второй – 8 экспертов. Специалисты представляли различные научные школы, учреждения и предприятия.

Каждому из специалистов предлагалось заполнить анкету, куда, помимо перечня факторов, их уровней, диапазона изменения, была внесена графа "ранг фактора".

Эксперт располагал факторы в порядке убывания их воздействия на прочность сцепления покрытия с основой, т.е. ранжировал их. Когда он не мог ука-

зять порядок следования двух или нескольких факторов, им приписывался один и тот же номер (ранг), а при вычислениях вводились так называемые связанные дробные ранги.

Результаты опроса двух групп специалистов представлены в табл. 1 и 2. Данные опроса обрабатывали по методике, рассмотренной в работе [1]. Для этого сначала подсчитывали суммы рангов для каждого фактора, затем находили разность между суммой рангов каждого фактора и средней суммой рангов всех факторов, квадраты этих разностей и сумму квадратов разностей. Затем были найдены средние значения суммы рангов (52,5 и 59,5), а также сумма квадратов отклонений (5301,5 и 4165,75).

Чтобы оценить степень согласованности мнений исследователей каждой группы, рассчитывали так называемый коэффициент конкордации:

для несвязанных рангов

$$W = \frac{12S}{m^2(k^3 - k)}, \quad (1)$$

для связанных

$$W = \frac{S}{m^2(k^3 - k)/12 - m \sum T_i}, \quad (2)$$

где S – сумма квадратов отклонений (сумма чисел, стоящих в последней строке табл. 1 и 2); m – число экспертов; k – количество факторов; $T_i = = 1/12 \cdot \sum (t_j^3 - t_j)$; t_j – j -е число одинаковых рангов в i -м ранжировании.

В шести строках табл. 2 есть связанные ранги. Поэтому, например, в строке $2T_2 = (2^3 - 2) + (4^3 - 4) = 66$, так как в ней четыре ранга по 10,5 и два ранга по 5,5. Соответственно $T_1 = 6, T_4 = 60, T_5 = 60, T_6 = 36$ и $T_7 = 36$. Подставляя в формулы (1) и (2) данные табл. 1 и 2, получим $W_1 = 0,48$, а $W_2 = 0,21$. Эти значения коэффициентов конкордации не позволяют уверенно судить о согласованности мнений экспертов. Поэтому воспользуемся критерием Пирсона χ^2 , который может быть вычислен соответственно для несвязанных и связанных рангов по следующим формулам:

$$\chi^2 = \frac{12S}{mk(k+1)}, \quad (3)$$

$$\chi^2 = \frac{S}{mk(k+1)/12 - 1/(k-1) \cdot \sum T_i}. \quad (4)$$

Подставляя известные значения S, m, k и T_i в выражения (3), (4), получим для первой группы экспертов $\chi_1^2 = 43,27$, а для второй $\chi_2^2 = 30,12$.

Сравним расчетные значения этих критериев с табличным при уровне доверия $\alpha = 0,05$ и степени свободы $f = 14 - 1 = 13$. По табл. 8 [1] $\chi^2 = 22,36$.

Таким образом, согласованность мнений экспертов в обеих группах подтверждается, так как оба расчетных значения χ_1^2 и χ_2^2 больше, чем табличное.

Табл. 1. Результаты ранжирования по данным первой группы специалистов

Номер экспер- та	Факторы													
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}
1	1	9	11	5	12	6	8	7	13	10	2	3	4	14
2	1	13	10	11	12	3	14	6	7	8	4	5	2	9
3	1	14	9	10	11	5	13	4	6	3	7	8	2	12
4	1	13	2	3	9	4	10	5	11	12	7	6	8	14
5	1	8	4	10	12	2	9	3	11	13	6	7	5	14
6	2	10	1	9	13	5	11	6	8	14	12	3	7	4
7	11	12	14	13	9	8	10	6	7	3	2	1	4	5
Σa_{ij}	18	79	51	61	78	33	75	37	63	63	40	33	32	72
Δ_i	-34,5	26,5	-1,5	8,5	25,5	-19,5	22,5	-15,5	10,5	10,5	-12,5	-19,5	-20,5	19,5
Δ_i^2	1190,25	702,25	2,25	72,25	650,25	380,25	506,25	240,25	110,25	110,25	156,25	380,25	420,25	380,25

П р и м е ч а н и е. Σa_{ij} – сумма рангов для каждого фактора; $\Sigma \bar{a}_{ij}$ – среднее значение суммы рангов; Δ_i – разность между суммой рангов для каждого фактора и средним значением этой суммы, т.е. $\Delta_i = \Sigma a_{ij} - \Sigma \bar{a}_{ij}$.

Табл. 2. Результаты ранжирования по данным второй группы специалистов

Номер экспер- та	Факторы														Число связанных рангов
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	
1	6	10	5,5	5,5	2	8	7	11	13	12	1	3	4	14	2
2	11	12	10,5	10,5	10,5	10,5	3	8	7	4	5,5	5,5	1	2	4 + 2
3	12	13	2	11	5	6	14	7	8	3	4	1	9	10	—
4	7	8	5	9	10	4	3	1	12,5	6	12,5	2	12,5	12,5	4
5	7	12	6	13	14	9	11	5	8	10	2,5	2,5	2,5	2,5	4
6	3	8	5	5	5	9	10	7	11,5	11,5	1,5	1,5	13	14	3 + 2 + 2
7	9	9	5,5	5,5	2	7	9	11	14	12	3,5	1	3,5	13	3 + 2 + 2
8	11	12	14	13	9	8	10	6	7	3	2	1	4	5	—
Σa_{ij}	66	84	53,5	72,5	57,5	61,5	67	56	81	61,5	32,5	17,5	49,5	73	
Δ_i	6,5	24,5	-6	13	-2	2	7,5	-3,5	21,5	2	-27	-42	-10	13,5	
Δ_i^2	42,25	600,5	36	169	4	4	56,25	12,25	462,25	4	729	1764	100	182,25	

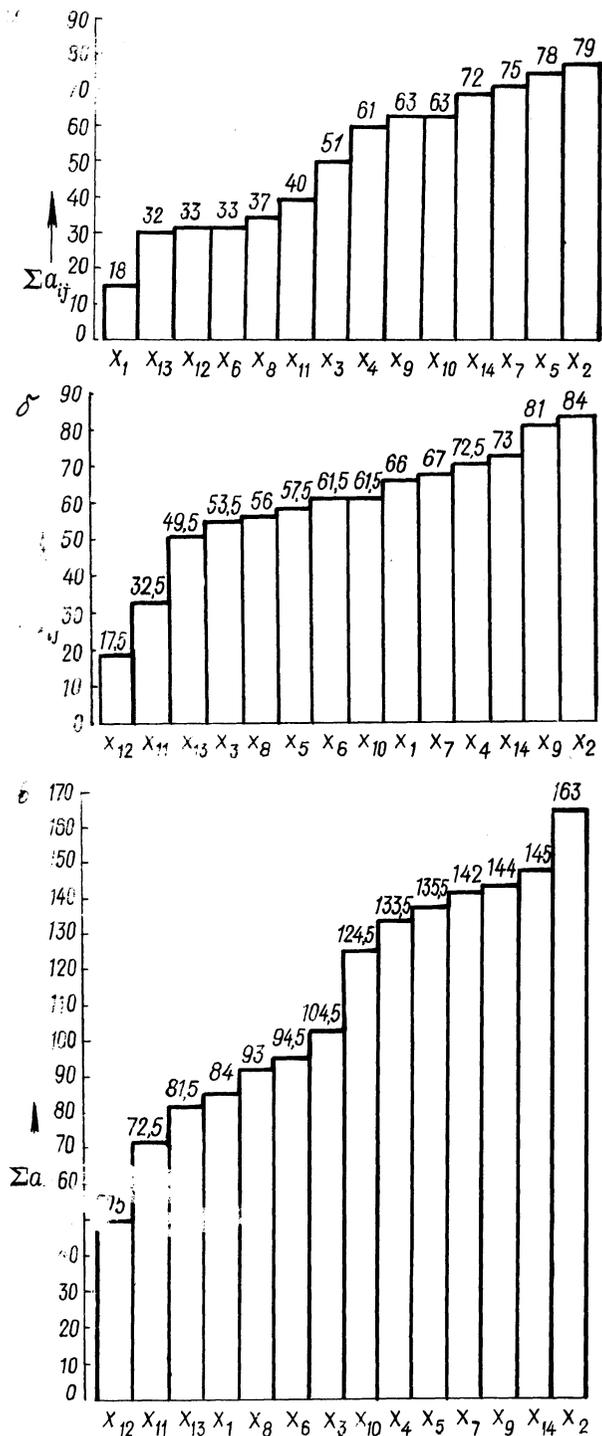


Рис. 1. Диаграммы рангов: а — для первой группы экспертов; б — для второй группы; в — для двух групп

Это позволяет построить среднюю априорную диаграмму рангов (рис. 1, а, б), откуда можно сделать следующие выводы.

Так как зависимость близка к экспоненциальной, в число важнейших факторов для первой группы можно включить $x_1, x_{13}, x_{12}, x_6, x_8, x_{11}, x_3$, т.е. семь факторов, сумма рангов которых меньше средней суммы рангов (52,5). Это будут соответственно метод нанесения покрытия, обработка поверхности, температура нагрева частиц, материал порошка, температура подогрева подложки, материал основы и размер частиц порошка.

В число значимых факторов для второй группы следует включить $x_{12}, x_{11}, x_{13}, x_3, x_8, x_5$, т.е. материал порошка, материал основы, обработка поверхности, размеры частиц порошка, температура подогрева основы и исходная плотность порошка.

Как видно, в оценке роли и места факторов мнения двух групп специалистов не совсем совпадают. Для определения согласованности их мнений воспользуемся коэффициентом ранговой корреляции Спирмена R [2]:

для несвязанных рангов

$$R = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^k \Delta_i^2}{k^3 - k},$$

для связанных

$$R = \frac{k(k^2 - 1)/6 - S - T - u}{\sqrt{[k(k^2 - 1)/6 - 2T] [k(k^2 - 1)/6 - 2u]}}, \quad (5)$$

где S – сумма квадратов отклонений рангов между группами; $T = 0,5 \sum t(t - 1)$; $u = 0,5 \sum u(u - 1)$; t и u – число повторений в первой и второй строках.

С этой целью запишем данные табл. 1 и 2 в следующем порядке:

Фактор	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Суммы рангов:														
I группы	18	79	51	61	78	33	75	37	63	63	40	33	32	72
II группы	66	84	53,5	72,5	57,5	61,5	67	56	81	61,5	32,5	17,5	49,5	73

Присвоив этим суммам ранги от 1 до 14, получим:

Фактор	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
I группа	1	14	7	8	13	3,5	12	5	9,5	9,5	6	3,5	2	11
II группа	9	14	4	11	6	7,5	10	5	13	7,5	2	1	3	12
Δ_i	-8	0	3	-3	7	-4	2	0	-3,5	2	4	2,5	-1	-1
Δ_i^2	64	0	9	9	49	16	4	0	12,25	4	16	6,25	1	1

Табл. 3. Результаты анализа рангов

Число экспертов	Сумма рангов факторов														Число повторяющихся рангов
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
$m_1 = 7$	18	79	51	61	78	33	75	37	63	63	40	33	32	72	2 + 2
$m_2 = 8$	66	84	53,5	72,5	57,5	61,5	67	56	81	61,5	32,5	17,5	49,5	73	2
$m_3 = 15$	84	163	104,5	133,5	135,5	94,5	142	93	144	124,5	72,5	50,5	81,5	145	
Δ_i	-28	51	-7,5	21,5	23,5	-17,5	30	-19	32	12,5	-39,5	-61,5	-30,5	33	
Δ_i^2	784	2601	56,25	462,25	552,25	306,25	900	361	1024	156,25	1560,25	3782,25	930,25	1089	

Тогда

$$S = 64 + 9 + 9 + 49 + 16 + 4 + 12,25 + 4 + 16 + 6,25 + 1 + 1 = 191,5; T = \\ = 0,5 \sum t(t-1) = 0,5 [2(2-1) + 2(2-1)] = 2; u = 0,5 \cdot 2(2-1) = 1.$$

Подставляя в формулу (5) значения S, T, u и k , получим

$$R = \frac{14(14^2 - 1)/6 - 191,5 - 2 - 1}{\sqrt{[14(14^2 - 1)/6 - 2 \cdot 2] [14(14^2 - 1)/6 - 2 \cdot 1]}} = 0,58.$$

Значения R в зависимости от согласованности ранжировок могут меняться от +1 (ранжировочные ряды совпадают) до -1 (отсутствие корреляции). Значимость коэффициента R оценивается с помощью табл. VI [2]. Для этого сначала вычисляется среднее квадратическое отклонение

$$\sigma_R = \sqrt{\frac{1}{k-1}} = \sqrt{\frac{1}{14-1}} = 0,28,$$

а затем отношение

$$z = \frac{R}{\sigma_R} = \frac{0,58}{0,28} = 2,07.$$

Вероятность согласованности ранжировок берется из табл. VI [2] (при $z = 2,07, P = 0,98$), что свидетельствует о неслучайности согласованности мнений специалистов двух групп. Поэтому можно рассматривать обе группы специалистов как одну и рассчитывать для нее значения коэффициентов конкордации W , критерия Пирсона χ^2 вышеуказанным способом, приняв $m = 15$.

Результаты расчета суммы рангов, их разности и суммы квадратов разностей приведены в табл.3, среднее значение суммы рангов - 112, сумма квадратов отклонений - 14 565.

По формулам (2) и (4) определены W и χ^2 для группы в целом. Они оказались соответственно равны 0,28 и 55,5, т.е. согласование мнений всех экспертов неслучайно. Диаграмма рангов для всей группы показана на рис. 1, в. Из нее видно, что распределение рангов неравномерное, а убывание экспоненциальное. Поэтому можно принять такое решение. Включить в реальный эксперимент следующие факторы: материал порошка (x_{12}), материал основы (x_{11}), метод обработки поверхности (x_{13}), метод нанесения покрытия (x_1), температуру подогрева подложки (x_8), температуру нагрева частиц порошка (x_6) и размеры частиц порошка (x_3), т.е. те факторы, суммы рангов которых меньше средней суммы рангов (в нашем случае она равна 112).

ЛИТЕРАТУРА

1. Кендалл М. Ранговые корреляции. - М., 1975. - 215 с. 2. Мастеров В.А. Практика статистического планирования эксперимента в технологии биметаллов. - М., 1974. - 241 с.