



УДК 519.21

© 2008

В. И. Большаков, А. Б. Загородний, Ю. И. Дубров

**Один из возможных путей решения
многокритериальной задачи материаловедения
на примере оптимизации технологии
плазменно-дугового напыления**

(Представлено академиком НАН Украины М. И. Гасиком)

For the solution of a given multicriterial problem, the algorithm of revealing the main criterion from the row of proper criteria and those governed variables, which provide its relative optimization, is developed and substantiated. The algorithm switches to the search of relative extremum of another criterion, and then and only then, when the priorities to criteria change (i. e. the initial conditions of a problem). The numerical solutions of the problem are demonstrated on the example of the search for optimal governed variables in the problem of optimization of a technology of plasma-arc spraying.

На протяжении всего времени существования искусства, практики и науки изготовления изделий из металлов и сплавов существовала задача получения желаемых физических, химических, механических и других свойств при производстве этих изделий [1]. Каждому из множества известных свойств соответствует определенный многомерный критерий — Y_i ($i = 1, \dots, n$), по которому оценивается то или иное качество металла, сплава, а также технологичность или экономичность его производства. Откуда следует, что для каждой технологии существует множество качественно неоднородных одномерных критериев — Y_i ($i = 1, \dots, n$), включающих в себя подмножество качественно однородных между собой критериев¹ — $\{Y_{i,r}^* (r = 1, \dots, s_i)\}$. Как правило, величина критерия трактуется как оценка степени достижения той или иной цели.

В теории исследования операций задача назначения цели и критерия, оценивающего степень ее достижения, называется многокритериальной. Все, что касается моделирования в этих задачах, особенно в задачах со смешанными однородными и неоднородными критериями, теория в основном ограничивает общими методологическими соображениями [2].

¹Например, Y_1 может выступать в качестве множества показателей механических свойств металла, таких как прочность $Y_{1,1}^*$, упругость $Y_{1,2}^*$ и т. д., а Y_2 может выступать как множество экономических показателей, таких как, например, прибыль $Y_{2,1}^*$, себестоимость $Y_{2,2}^*$ и т. д.

В качестве примера возьмем технологию создания уплотнительного прирабатываемого покрытия для деталей компрессора газотурбинного двигателя (ГТД), получаемого методом плазменно-дугового напыления. При проектировании компрессора ГТД стремятся создать минимально возможные радиальные и осевые зазоры между ротором и статором, предотвращающие перетекание газовых потоков из области с более высоким давлением в область с меньшим давлением. Величина зазоров существенно влияет на характеристики компрессора и двигателя в целом, а именно, на КПД компрессора, тягу двигателя и удельный расход топлива. Поэтому для обеспечения работоспособности уплотнения при минимальных и даже нулевых зазорах корпус компрессора должен иметь специальное мягкое, легко прирабатываемое покрытие, которое наносят на внутреннюю поверхность корпуса. Ширина этого покрытия должна быть несколько больше проекции ширины лопатки компрессора на ее периферии. Лопатки компрессора, в процессе его работы, при касании покрытия прорезают в нем канавки, не приводя к стопорению и разрушению ротора.

В настоящее время применяют специальные полимерные покрытия, а также покрытия, создаваемые на основе применения графита, талька, асбеста, алюминиевой пудры, с добавками специальных лаков или силикатных связок. При этом использование данных покрытий допустимо при стабильности их характеристик во времени, при рабочих температурах до 650 °С, что весьма затруднительно.

В связи с вышеизложенным, разработка составов новых уплотнительных прирабатываемых покрытий, а также технологии их нанесения вообще, и в частности методом плазменно-дугового напыления носит весьма актуальный характер.

Мы предлагаем отнести рассматриваемую задачу оптимизации технологии плазменно-дугового напыления к классу задач со смешанными однородными и неоднородными критериями. Последнее продиктовано тем, что данный технологический процесс включает четыре критерия, характеризующие качество покрытия: Y_1 — когезия покрытия (КГС/мм²); Y_2 — твердость покрытия; Y_3 — (НВ)-пористость покрытия (%); Y_4 — износ изделия (например, лопаток турбин), работающего в паре с плазменным покрытием из соответствующего материала (%) и два критерия, которые характеризуют работоспособность покрытия, — это его термостойкость Y_5 (количество термоциклов, которые выдерживает изделие с соответствующим покрытием) и жаростойкость Y_6 (мг/ч).

Названные критерии могут между собой входить в противоречия, в том смысле, что изменение одного из них в сторону улучшения может привести к изменению одного или нескольких других в сторону ухудшения, поэтому возникает задача определения области “компромисса” критериев.

Эта задача также включает в качестве начальных условий набор управляемых переменных X_j ($j = 1, \dots, m$) (см. табл. 1), являющихся частью определяющих параметров.

Соглашение 1. Областью “компромисса” критериев будем называть такую область, для которой изменения управляемых переменных приводят к непротиворечивым изменениям критериев в том смысле, что если они вступают между собой в противоречия², то эти противоречия настолько незначительные, что их численные значения не выходят за пределы требований технологии.

Соглашение 2. Определяющими параметрами мы называем такие переменные технологического процесса плазменно-дугового напыления, относительно незначительные изме-

²Т.е. увеличение одного критерия приводит к уменьшению нескольких других, или наоборот.

Таблица 1

№	Параметры	№				Код
		1	2	3	4	
1	Уровни переменных	О.У.	И.В.	В.У	Н.У	X_0
2	Алюмофосфат $Al(НРО_4)_3$, % (вес.)	25	3	26	20	X_1
3	Нитрид бора, % (вес.)	34	4	38	30	X_2
4	Алюминий Al, % (вес.)	34	4	38	30	X_3
5	Фракция порошка, мм	0,15	0,05	0,2	0,1	X_4
6	Мощность, кВт	23	5	28	18	X_5
7	Расход аргона, л/мин	17,5	2,5	20	15	$X_6 = x_1x_2$
8	Расход азота, л/мин	12,5	2,5	15	10	$X_7 = x_1x_3$
9	Расход транспортирующего газа аргона, л/мин	3,5	1,5	5	2	$X_8 = x_1x_4$
10	Дистанция напыления, мм	100	20	120	80	$X_9 = x_1x_5$
11	Расход напыляемого порошка, г/мин	25	15	40	10	$X_{10} = x_2x_3$
12	Диаметр сопла, мм	7	1	8	6	$X_{11} = x_2x_4$
13	Когезионная прочность	До 3 кгс/мм ²				Y_1^{cp}
14	Твердость	Твердость {13 ÷ 19} НВ				Y_2^{cp}
15	Пористость	{22 ÷ 27}%				Y_3^{cp}
16	Износ лопаток турбин	До 20%				Y_4^{cp}
17	Термостойкость	Не менее 1250 циклов, 650 ↔ 60 °С				Y_5^{cp}
18	Жаростойкость	мг/ч				Y_6^{cp}

нения которых приводят к воспроизводимым изменениям численных значений критериев Y_i ($i = 1, \dots, n$) на величины, превосходящие ошибку опыта.

Привлекательным, с точки зрения применения инструмента, для моделирования и оптимизации подобных по сложности технологий является случайное и неопределенное свертывание, в котором суммарным критерием объявляется тот или иной частный критерий, в зависимости от того, какие численные значения принимают неуправляемые переменные, влияющие на ход технологического процесса³ [3]. Организмический анализ [4] этого способа свертки показывает, что он является наиболее близким к тому, который использует человек при выборе той или иной цели из множества альтернативных. Трудности формализации этого вида свертывания часто продиктованы невозможностью учета всего перечня неуправляемых факторов. Эти трудности инициировали поиск методов решения поставленной задачи, среди которых наиболее предпочтительным оказался метод планирования экстремальных экспериментов [5–15], который предусматривает проведение активных экспериментов в некоторой рабочей области процесса, заданной численными значениями управляемых переменных $X_k \in X_i$ — процесса газотермического напыления (см. табл. 1).

Матрица планирования (табл. 2) формировалась так, что все переменные представлялись на двух уровнях — верхнем (+) и нижнем (–). Таким образом, каждая строка матрицы (см. табл. 2) представляет один конкретно взятый эксперимент, результаты проведения которого записаны в столбцах 13, 14, 15, 16, 17, 18 матрицы.

Согласно результатам проведенных экспериментов и их интерпретации (табл. 3, столбец 7), для каждого критерия существует пара управляемых переменных, оказывающих наибольшее влияние на соответствующий критерий, откуда следует, что для каждого критерия из множества Y_i ($i = 1, \dots, n$) существует некоторая субоптимальная область, за-

³Незнание перечня всех неуправляемых факторов — это естественное состояние исследователя, которое часто возникает при идентификации сложных систем, включающих большое число переменных, сильно взаимосвязанных между собой, часть из которых изменяется по неизвестным законам.

Таблиця 2

№	X_0	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	Y_1^{CP}	Y_2^{CP}	Y_3^{CP}	Y_4^{CP}	Y_5^{CP}	Y_6^{CP}
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	1,950	10,070	30,00	12,600	1050,0	0,003
2	+	+	+	+	+	-	+	+	+	-	+	+	1,560	9,310	22,00	10,800	800,0	0,002
3	+	+	+	+	-	+	+	+	-	+	+	-	2,670	13,490	22,00	15,600	937,5	0,003
4	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	+	-	2,280	12,730	15,00	13,800	687,5	0,003
5	+	+	+	-	+	+	+	-	+	+	-	+	1,410	14,060	26,00	14,200	637,5	0,003
6	+	+	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	1,020	13,300	18,00	12,400	387,5	0,002
7	+	+	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	2,130	17,480	18,00	17,200	525,0	0,003
8	+	+	+	-	-	-	+	-	-	-	-	-	1,740	16,720	11,00	15,400	275,0	0,003
9	+	+	-	+	+	+	-	+	+	+	-	-	2,670	15,390	25,00	18,200	1250,0	0,002
10	+	+	-	+	+	-	-	+	+	-	-	-	2,280	14,630	17,00	16,400	1000,0	0,002
11	+	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	2,790	17,290	21,00	20,000	1112,5	0,003
12	+	+	-	+	-	-	-	+	-	-	-	+	2,400	16,530	13,00	18,200	862,5	0,002
13	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-	1,830	17,100	24,00	17,800	762,5	0,002
14	+	+	-	-	+	-	-	-	+	-	+	-	1,440	16,340	16,00	16,000	512,5	0,002
15	+	+	-	-	-	+	-	-	-	+	+	+	1,950	19,000	19,00	19,600	625,0	0,002
16	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	1,560	18,240	12,00	17,800	375,0	0,002
17	+	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	2,340	7,980	28,00	9,400	837,5	0,002
18	+	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	1,350	5,700	22,00	6,400	537,5	0,002
19	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	+	-	2,640	9,880	22,00	10,800	675,0	0,002
20	+	-	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	1,650	7,600	16,00	7,800	375,0	0,002
21	+	-	+	-	+	+	-	+	-	-	-	+	2,700	14,630	17,00	14,200	825,0	0,003
22	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	1,710	12,350	11,00	11,200	525,0	0,002
23	+	-	+	-	-	+	-	+	+	-	-	-	3,000	16,530	11,00	15,600	662,5	0,003
24	+	-	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	2,010	14,250	5,00	12,600	362,5	0,002
25	+	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	-	2,760	11,400	29,00	13,000	912,5	0,001
26	+	-	-	+	+	-	+	-	-	+	-	-	1,770	9,120	23,00	10,000	612,5	0,001
27	+	-	-	+	-	+	+	-	+	-	-	+	2,460	11,780	26,00	13,200	725,0	0,001
28	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	-	+	1,470	9,500	20,00	10,200	425,0	0,001
29	+	-	-	-	+	+	+	+	-	-	+	-	2,820	15,770	20,00	15,800	825,0	0,002
30	+	-	-	-	+	-	+	+	-	+	+	-	1,830	13,490	14,00	12,800	525,0	0,001
31	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	+	+	2,520	16,150	17,00	16,000	637,5	0,002
32	+	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	1,530	13,870	11,00	13,000	337,5	0,001

Таблица 3. Продолжение

1	2	3	4	5	6	7
4	Износ лопаток турбин	Y_4	$K_{\text{набл}} = 0,340$ при $K_{\text{кр}} = 0,475$ Опыты воспроизводимые	$Y_4^{\text{CT}} = 14,000 + 2,000X_1 - 1,500X_2 - 1,100X_3 - 0,800X_4 + 1,200X_5 - 0,500X_6 + 0,800X_7 - 0,400X_8 - 0,300X_9 - 0,500X_{10} - 0,300X_{11} - 0,500X_2X_3 \quad (7)$ $Y_4^{\text{норм}} = -13,612 + 0,667X_1 + 0,688X_2 + 0,787X_3 - 16,000X_4 + 0,240X_5 - 0,200X_6 + 0,320X_7 - 0,267X_8 - 0,015X_9 - 0,033X_{10} - 0,300X_{11} - 0,031X_2X_3 \quad (8)$	$F_{\text{набл}} = 1,068,$ $F_{\text{кр}} = 2,200$ Модель адекватно описывает исследуемую область	
5	Термо-стойкость	Y_5	$K_{\text{набл}} = 0,335$ при $K_{\text{кр}} = 0,475$ Опыты воспроизводимые	$Y_5^{\text{CT}} = 675,000 + 62,500X_1 - 43,750X_2 + 125,000X_3 + 75,000X_4 + 137,500X_5 - 31,250X_6 + 100,000X_7 - 12,500X_8 - 12,500X_9 - 18,750X_{10} - 6,250X_{11} - 18,750X_2X_3 \quad (9)$ $Y_5^{\text{норм}} = -2821,563 + 20,833X_1 + 28,906X_2 + 71,094X_3 + 1500,000X_4 + 27,500X_5 - 12,500X_6 + 40,000X_7 - 8,333X_8 - 0,625X_9 - 1,250X_{10} - 6,250X_{11} - 1,172X_2X_3 \quad (10)$	$F_{\text{набл}} = 1,018,$ $F_{\text{кр}} = 2,200$ Модель адекватно описывает исследуемую область	
6	Жаро-стойкость	Y_6	$K_{\text{набл}} = 0,333$ при $K_{\text{кр}} = 0,475$ Опыты воспроизводимые	$Y_6^{\text{CT}} = 0,00209 + 0,00034X_1 + 0,00041X_2 - 0,00009X_3 - 0,00009X_4 + 0,00022X_5 - 0,00009X_6 + 0,00016X_7 - 0,00009X_8 - 0,00003X_9 - 0,00003X_{10} - 0,00003X_{11} - 0,00003X_2X_3 + 0,00003X_2X_3X_4 - 0,00003X_1X_3X_4 \quad (11)$ $Y_6^{\text{норм}} = 0,00632 - 0,00015X_1 + 0,00037X_2 + 0,00006X_3 + 0,00255X_4 + 0,00004X_5 - 0,00004X_6 + 0,00006X_7 - 0,00006X_8 - 0,00003X_{11} - 0,00001X_2X_3 - 0,00133X_2X_4 + 0,00001X_1X_3 - 0,00013X_3X_4 + 0,00177X_1X_4 + 0,00004X_2X_3X_4 - 0,00005X_1X_3X_4 \quad (12)$	$F_{\text{набл}} = 1,000,$ $F_{\text{кр}} = 2,200$ Модель адекватно описывает исследуемую область	

Таблица 3. Продолжение

1	2	3	4	5	6	7
4	Износ лопаток турбин	Y_4	$K_{\text{набл}} = 0,340$ при $K_{\text{кр}} = 0,475$ Опыты воспроизводимые	$Y_4^{\text{CT}} = 14,000 + 2,000X_1 - 1,500X_2 - 1,100X_3 - 0,800X_4 + 1,200X_5 - 0,500X_6 + 0,800X_7 - 0,400X_8 - 0,300X_9 - 0,500X_{10} - 0,300X_{11} - 0,500X_2X_3 \quad (7)$ $Y_4^{\text{норм}} = -13,612 + 0,667X_1 + 0,688X_2 + 0,787X_3 - 16,000X_4 + 0,240X_5 - 0,200X_6 + 0,320X_7 - 0,267X_8 - 0,015X_9 - 0,033X_{10} - 0,300X_{11} - 0,031X_2X_3 \quad (8)$	$F_{\text{набл}} = 1,068,$ $F_{\text{кр}} = 2,200$ Модель адекватно описывает исследуемую область	
5	Термостойкость	Y_5	$K_{\text{набл}} = 0,335$ при $K_{\text{кр}} = 0,475$ Опыты воспроизводимые	$Y_5^{\text{CT}} = 675,000 + 62,500X_1 - 43,750X_2 + 125,000X_3 + 75,000X_4 + 137,500X_5 - 31,250X_6 + 100,000X_7 - 12,500X_8 - 12,500X_9 - 18,750X_{10} - 6,250X_{11} - 18,750X_2X_3 \quad (9)$ $Y_5^{\text{норм}} = -2821,563 + 20,833X_1 + 28,906X_2 + 71,094X_3 + 1500,000X_4 + 27,500X_5 - 12,500X_6 + 40,000X_7 - 8,333X_8 - 0,625X_9 - 1,250X_{10} - 6,250X_{11} - 1,172X_2X_3 \quad (10)$	$F_{\text{набл}} = 1,018,$ $F_{\text{кр}} = 2,200$ Модель адекватно описывает исследуемую область	
6	Жаростойкость	Y_6	$K_{\text{набл}} = 0,333$ при $K_{\text{кр}} = 0,475$ Опыты воспроизводимые	$Y_6^{\text{CT}} = 0,00209 + 0,00034X_1 + 0,00041X_2 - 0,00009X_3 - 0,00009X_4 + 0,00022X_5 - 0,00009X_6 + 0,00016X_7 - 0,00009X_8 - 0,00003X_9 - 0,00003X_{10} - 0,00003X_{11} - 0,00003X_2X_3 + 0,00003X_2X_3X_4 - 0,00003X_1X_3X_4 \quad (11)$ $Y_6^{\text{норм}} = 0,00632 - 0,00015X_1 + 0,00037X_2 + 0,00006X_3 + 0,00255X_4 + 0,00004X_5 - 0,00004X_6 + 0,00006X_7 - 0,00006X_8 - 0,00003X_{11} - 0,00001X_2X_3 - 0,00133X_2X_4 + 0,00001X_1X_3 - 0,00013X_3X_4 + 0,00177X_1X_4 + 0,00004X_2X_3X_4 - 0,00005X_1X_3X_4 \quad (12)$	$F_{\text{набл}} = 1,000,$ $F_{\text{кр}} = 2,200$ Модель адекватно описывает исследуемую область	

данная парой самых значимых для этого критерия управляемых переменных при условии, что остальные управляемые переменные фиксированы на основном уровне. В 7-м столбце табл. 3 приведены гистограммы, показывающие “вес” и направление влияния каждой управляемой переменной на соответствующий критерий.

Такая интерпретация делает возможным осуществление выбора наиболее значимой для каждого критерия пары управляемых переменных. Так, например, как это следует из табл. 3, для критерия Y_1 –когезия, парой наиболее значимых управляемых переменных, согласно анализу проведенных экспериментов, оказались переменные X_5 — мощность и X_7 — расход азота. Если изменение управляемой переменной в сторону ее увеличения приводит к увеличению критерия, обозначим этот факт знаком \uparrow , а если к уменьшению — знаком \downarrow . После чего влияние переменных, например, на критерий Y_1 формально выразим так, как это показано в столбце 2 табл. 4.

Однако все, что диктует нам опыт, не всегда согласуется с требованиями технологии: согласно экспериментальным данным, на критерий Y_2 –твердость самое большое влияние оказывает пара X_1X_3 , хотя увеличение управляемой переменной X_3 (процентное содержание алюминия) снижает твердость.

На основании этого и полученных в результате анализа уравнений (1)–(12), гистограммы (5-й и 7-й столбец табл. 3) выявлены самые значимые пары управляемых переменных для каждого критерия как согласно анализу экспериментальных данных, так и согласно технологии (см. табл. 4).

Согласно соглашению 1, область компромисса для критериев Y_i должна определяться такими численными значениями переменных $X_k \in X_k$, для которых

$$\forall Y_i \in \Theta, \tag{1}$$

где Θ — область допустимых экстремальных значений для всех критериев Y_i .

Условие (1) — это идеальный случай, который практически возможен только для простых технологий с малым числом переменных, линейно связанных между собой. В силу разнонаправленности и разнородности критериев в задаче оптимизации технологии плазменно-дугового напыления условие (1), как это следует из табл. 4, не выполняется.

Алгоритм оптимизации технологии плазменно-дугового напыления осуществлялся путем выбора наиболее приоритетного для заданных условий критерия Y_i^* и проведения его условной оптимизации [3]. При этом в процессе поиска условного экстремума для критерия Y_i^* численные значения остальных критериев Y_r не выходили за пределы допустимых отклонений δ_r :

$$\forall Y_r \neq Y_i^*, \quad Y_r \leq \delta_r, \tag{2}$$

где δ_r — величина отклонения, продиктованная технологическими условиями.

Таблица 4

Критерий	Наиболее значимая пара переменных согласно анализу экспериментов	Наиболее значимая пара переменных согласно требованиям технологии
Когезия	$Y_1 \Rightarrow X_5 \uparrow \oplus X_7 \uparrow$	$\uparrow Y_1 \Rightarrow X_5 \uparrow \oplus X_7 \uparrow$
Твердость	$Y_2 \Rightarrow X_1 \uparrow \oplus X_3 \downarrow$	$\uparrow Y_2 \Rightarrow X_1 \uparrow \oplus X_5 \uparrow$
Пористость	$Y_3 \Rightarrow X_3 \downarrow \oplus X_5 \downarrow$	$\downarrow Y_3 \Rightarrow X_3 \uparrow \oplus X_5 \uparrow$
Износ лопаток турбин	$Y_4 \Rightarrow X_1 \uparrow \oplus X_2 \downarrow$	$\downarrow Y_4 \Rightarrow X_2 \uparrow \oplus X_3 \uparrow$
Термостойкость	$Y_5 \Rightarrow X_3 \uparrow \oplus X_5 \uparrow$	$\uparrow Y_5 \Rightarrow X_3 \uparrow \oplus X_5 \uparrow$
Жаростойкость	$Y_6 \Rightarrow X_1 \uparrow \oplus X_2 \uparrow$	$\uparrow Y_6 \Rightarrow X_1 \uparrow \oplus X_2 \uparrow$

Выполнение условия (2) проверялось с помощью дополнительных вычислений, которые заключались в том, что из анализа полученных гистограмм (см. табл. 3, 7-й столбец) определялась пара $x_i^* x_k^*$ самых значимых переменных для каждого критерия. Затем, по уже полученным уравнениям регрессии (1)–(12), численно исследовалось влияние каждой значимой пары $x_i^* x_k^*$ на соответствующий критерий Y_i^* , при этом все остальные управляемые переменные $X_k \in X_k$ фиксировались на основном уровне.

Численные исследования заключались в том, что, согласно заданному количеству итераций S , каждому управляемому переменному из пары $x_i^* x_k^*$ придавалось приращение $\lambda_i + x_i^*$, $\lambda_k + x_k^*$, величина которого λ зависела от количества заданных итераций S и интервала варьирования I , каждой значимой переменной из пары $x_i^* x_k^*$

$$\lambda = \frac{I}{S},$$

после чего производились вычисления численных значений соответствующего критерия Y_i^* в каждой точке координатной сетки $Y_i^* x_i^* x_k^*$ при выполнении условия (2).

Результаты этих исследований представлены системой уравнений (3)

$$\left\{ \begin{array}{l} Y_1 = -0,642 + 0,069x_5 + 0,09x_7, \\ Y_2 = -2,387 + 0,536x_1 + 0,152x_5, \\ Y_3 = 60,345 - 0,787x_3 - 0,69x_5, \\ Y_4 = 36,1 - 0,375x_2 - 0,275x_3, \\ Y_5 = -1020 + 31,25x_3 + 27,5x_5, \\ Y_6 = -3,325 + 0,125x_1 + 0,075x_2. \end{array} \right. \quad (3)$$

Применение данных уравнений в каждой конкретной ситуации, продиктованной необходимостью выбора наиболее приоритетного критерия Y_i^* , позволяет определять пару управляемых переменных $x_i^* x_k^*$ и их численные значения, обеспечивающие экстремум критерия Y_i^* с одновременным выполнением условия (2).

1. *Большаков В. И., Береза О. Ю., Миронова О. Ю., Марченко В. И.* Материаловедение. – Оттава: Базилан Пресс, 1998. – 219 с.
2. *Гермеер Ю. Б.* Введение в теорию исследования операций. – Москва: Наука, 1971. – 381 с.
3. *Большаков В. И., Дубров Ю. И.* Решение многокритериальной задачи металловедения с качественно неоднородными критериями // Доп. НАН України. – 2004. – № 11. – С. 95–103.
4. *Рашиевский Н.* Организмические множества: очерк общей теории биологических и социальных организмов // Исследование по общей теории систем. – Москва: Прогресс, 1969. – С. 442–462.
5. *Налимов В. В., Чернова Н. А.* Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. – Москва: Наука, 1965. – 340 с.
6. *Горский В. Г., Адлер Ю. П.* Планирование промышленных экспериментов. – Москва: Мир, 1974. – 264 с.
7. *Лысенков А. Н.* Планирование эксперимента при временных дрейфах // Планирование эксперимента. – Москва: Наука, 1966. – 321 с.
8. *Круг Г. К., Лысенков А. Н.* Планирование эксперимента в условиях временного дрейфа // Тр. МЭИ. – 1966. – Вып. 67. – С. 127–173.
9. *Налимов В. В.* Статистические методы описания химических и металлургических процессов. – Москва: Наука, 1966. – 178 с.
10. *Дубров Ю. И., Ковальчук Д. С.* К вопросу оптимизации объектов с частичным индетерминизмом // Применение математических методов в прогнозировании производственно-технического развития предприятий и областей народного хозяйства. – Кишинев, 1970. – С. 52–54.

11. Хикс Ч. Основные принципы планирования эксперимента. – Москва: Мир, 1967. – 400 с.
12. Дубров Ю. И. К вопросу об оптимизации многопараметрических технологий: Сб. научн. тр. Строительство. Вып. 5. – Днепропетровск: АТЗТ ВКФ “Арт-Пресс”, 1998. – С. 128–133.
13. Налимов В. В. Теория эксперимента. – Москва: Наука, 1971. – 207 с.
14. Финни Д. Введение в теорию планирования эксперимента. – Москва: Наука, 1970. – 287 с.
15. Vox G. E. P., Wilson K. B. On the Experimental Attainment of Optimum Conditions // J. of the Royal Statistical Society. Ser. B. – 1951. – 13, No 1, 1. – P. 1–45.

Приднепровская государственная академия
строительства и архитектуры, Днепропетровск

Поступило в редакцию 12.06.2007

УДК 541.124

© 2008

М. П. Савяк, И. В. Уварова, И. И. Тимофеева, В. Ф. Литвиненко,
член-корреспондент НАН Украины Ю. М. Солонин

Взаимодействие механически активированного гидрида титана с азотом и кислородом

The milling of titanium hydride in a planetary mill is shown to increase the specific surface area of powder, to decrease the hydrogen content in it, and to intensify chemical activity. This makes it possible to obtain titanium nitride from the titanium hydride in a nitrogen atmosphere at as low temperature as 500 °C. Due to the presence of oxygen adsorbed by a mechanically activated powder under heating in a nitrogen atmosphere, the reaction of intramolecular oxidation-reduction of titanium takes place. As a result, the lower oxide Ti₂O is formed.

Проблема устойчивости гидрида титана изучается как для снижения его температуры диссоциации с целью получения эффективных аккумуляторов водорода, так и для использования его в качестве прекурсоров при получении различных соединений. Влияние примесей кислорода (углерода, азота) на температуру диссоциации гидридов описано в работе [1]. Воздействие механического диспергирования на термическую устойчивость гидрида титана TiH_{1,9} изучено в работе [2], где авторы указывают на существенное снижение температуры диссоциации диспергированного гидрида, а также на образование примесей железа за счет намола мелющихся шариков, что, в свою очередь, может повлиять на снижение температуры разложения гидрида титана.

Задача данной работы — изучить влияние механической активации гидрида титана в среде азота на процессы его взаимодействия с азотом и кислородом при температурах 300–600 °С.

Методика эксперимента. Порошок гидрида титана TiH_{1,89} (производство Запорожского титано-магниевого комбината) с удельной поверхностью 0,1 м²/г и размером частиц 0,5–1 мм подвергали интенсивной механической обработке в планетарной мельнице АИР (скорость вращения водила 1440 об/мин) в стальных барабанах с использованием стальных шаров в среде азота в течение 15 и 60 мин. Среда азота в барабанах создавалась посредством заполнения барабана жидким азотом. В качестве кислородсодержащей компоненты