

The solving of multiple-factor metallurgical problems by means of mathematical planning of experimentation is examined in detail.

Г. Ф. ПРОТАСЕВИЧ, БНТУ

УДК 621.793:519.28

РЕШЕНИЕ МНОГОФАКТОРНЫХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

«В середине XX столетия научно-техническая революция охватила все сферы человеческой деятельности и отразилась на методах и средствах, которые использовались в исследовательской работе. Начали применяться все более точные и объективные методы исследования, расширились контакты между специалистами разных предметных областей. Подобные контакты могли осуществляться только при использовании математического языка, обладающего высокой степенью общности и универсальности для различных отраслей знаний» [1].

«Во всем мире была осознана практическая полезность математических методов исследования. В частности, при оптимизации технологических процессов в металлургической, химической и иных отраслях промышленности применение методов математического планирования экспериментов (МПЭ) позволило повысить выход продукта обычно на 30–300%» [2].

Трудности внедрения МПЭ в практику, идеи которого зародились еще в первой трети XX столетия, и столь «долго» шли до рядового инженера-исследователя, возможно, в значительной мере определялись тем, что «универсальный» язык математики не всегда понятен практическому инженеру. Хотя и читают в техническом вузе 4–5 семестров курс математики, но, к сожалению, как показывает опыт, весьма оторвано от решаемых практических инженерных задач. Это объяснимо, ибо математик, получивший университетское образование, редко, да и вряд ли может оценить то многообразие и специфичность инженерных задач, которые возникают в различных областях техники. В результате возникает ситуация, когда один знает, что делать, другой, как сделать, но разговаривают они на разных языках, а не на «универсальном». Симптоматично в этом плане рассуждение авторов статьи в

юбилейном номере «Заводская лаборатория» [3]. «Например, широко распространена вера в то, что статистические данные часто подчиняются нормальному распределению. Математики думают, что это экспериментальный факт, установленный в прикладных исследованиях. Прикладники же уверены, что математики доказали нормальность результатов наблюдений. Между тем анализ конкретных результатов наблюдений, в частности погрешностей измерений, приводит всегда к одному и тому же выводу – в подавляющем большинстве случаев реальные распределения существенно отличаются от нормальных» [2].

Кафедре «Металловедение» БПИ в этом плане повезло, так как там работает прекрасный консультант Ф.С.Новик – опытный инженер-металлург и грамотный математик. Как следствие, уже в 1970 г. была опубликована работа [4], выполненная автором этой статьи при консультации Ф.С.Новика в качестве выпускной на факультете повышения квалификации при МиСиС и посвященная оптимизации процесса жидкостного силицирования.

Задачи металлургии вообще, и в частности химико-термической обработки (ХТО), зачастую весьма сложны и разнохарактерны и подход к их решению может быть существенно различным. Для этого можно использовать ряд методов МПЭ, что было показано в [5]. Поэтому здесь будет рассмотрено применение лишь одного метода, но более подробно.

Типичные составы сред для ХТО описываются следующей обобщенной формулой:

$$\begin{aligned} & \text{Базовое (поставщик насыщающего} \\ & \text{элемента) вещество} + \\ & + \text{восстановитель} + \text{активатор.} \end{aligned} \quad (1)$$

Каждая из перечисленных составляющих может быть сложной по составу, особенно в случае

получения многокомпонентных покрытий. Поэтому налицо многофакторные задачи, тем более, учитывая, что к перечисленным вещественным факторам надо добавить температурно-временные. В результате возникает задача по отсеиванию на 1-м этапе части факторов, которые могут оказаться несущественными при решении данной конкретной задачи и могут быть отнесены к «шумовому» полю.

Таким образом, одним из «узких» вопросов ХТО является поиск компонентов составов для получения конкретных видов покрытий, особенно на стадии начальной разработки процесса. Для примера укажем, что в проведенном Л.Г.Ворошиным и автором данной статьи анализе изобретательской работы в области ХТО за период 1956–1983 гг. [6] среди 1125 а.с. фигурируют 165 изобретений, посвященных борированию. При этом в качестве поставщиков бора предлагается использовать девять веществ, в качестве активаторов – свыше 20. Выбор того или иного активатора авторами изобретений обычно никак не аргументируется или аргументируется зачастую примерно так, как о таком «выборе» говорилось в знаменитой книге «Физики шутят» – «другого у нас просто не было». Поэтому возникает проблема отсеивания малозначимых факторов, которую можно решать с помощью мало используемых вообще, и в ХТО в частности, методов МПЭ, например, применить для этой цели метод «случайного» баланса [7].

В ряде случаев, когда требуется выделить не только сильно влияющие факторы, но и их взаимодействия, можно высказать предположение о том, что количество значимых эффектов значительно меньше общего числа эффектов, взятых под подозрение. Тогда можно применять сверхнасыщенные планы, число опытов в которых (N) значительно меньше общего числа оцениваемых эффектов и их взаимодействий (k'). Формально это означает, что число степеней свободы ($N-k'$) становится отрицательной величиной и поэтому нельзя дать строгой качественной оценки влиянию всех факторов и их взаимодействий. Но при проведении отсеивающих экспериментов этого и не требуется. Здесь достаточно провести лишь предварительное «расщепление» математической модели, отсекая большую часть эффектов к шумовому полю. Под шумовым полем понимается совокупность малозначимых эффектов и случайной составляющей. Тогда оставшиеся эффекты могут быть выбраны для дальнейшего исследования и оценены количественно [7].

«Для отсеивания небольшого числа значимых эффектов на шумовом поле был предложен так называемый метод случайного баланса. Цель метода – в результате небольшого числа экспериментов построить диаграмму рангов и выделить наиболее сильно влияющие факторы и их взаимодей-

ствия. Идея метода крайне проста. Варьируя факторы на нескольких уровнях, вместо регулярных дробных реплик, представляющих собой некоторые систематические выборки из полного факторного эксперимента, предлагается брать случайные выборки. При этом совместные оценки эффектов оказываются смешанными некоторым случайным образом, что и позволяет выделить некоторое число наиболее сильно влияющих факторов и их взаимодействий. Поскольку часть эффектов будет отнесена к шумовому полю, дисперсия, характеризующая ошибку опыта, естественно возрастает. В результате количественная оценка выделенных эффектов будет производиться с большой ошибкой. Следовательно, метод случайного баланса обладает малой чувствительностью (т.е. способностью выделять коэффициенты регрессии, значимо отличающиеся от нуля), но большой разрешающей способностью (т.е. способностью выделять сильно влияющие эффекты среди большого числа эффектов, взятых под подозрение)» [7].

При планировании по методу случайного баланса факторы варьируют чаще всего на двух уровнях, хотя число уровней может быть и большим. Факторы кодируют по формулам, для чего каждому из них устанавливают основной уровень, интервалы варьирования и значения его на верхнем (+1) и нижнем (-1) уровнях:

$$x_i = \frac{X_{i1} - X_{i0}}{\Delta X_i} \quad (2)$$

или

$$X_i = X_{i0} + x_i \Delta X_i, \quad (3)$$

где X_{i0} и ΔX_i – соответственно основной уровень и интервал варьирования i -го фактора.

Рассмотрим применение метода случайного баланса на примере выбора перспективных активаторов для процесса борирования в порошках. Как уже упоминалось, авторами изобретений в области борирования в порошках предложено свыше 20 активаторов. Из них по ранговому принципу было отработано 11 – AlF_3 , NH_4I , NH_4Br , KBr , CaF_2 , LiF , Na_3AlF_6 , BaF_2 , NaF , KBF_4 , NH_4BF_4 . Для решения задачи была выбрана матрица случайного баланса, включающая 16 опытов и заимствованная в [7]. Для более объективной оценки эксперимент проводили на двух марках инструментальных сталей – У7 и ХВГ и борировали при температурах 800 и 950 °С. Содержание активаторов в смесях поддерживали постоянным – 0,5% от массы базовой составляющей (70% $\text{V}_4\text{C} + 30\% \text{Al}_2\text{O}_3$). Время борирования также было постоянным – 6 ч.

Сложностью решавшейся задачи являлось отсутствие однозначной оценки результатов борирования, так как боридный слой имеет сложную структуру – может быть однофазным (Fe_2B) и

двухфазным ($\text{Fe}_2\text{B} + \text{FeB}$); имеет игольчатую структуру, причем игольчатость определяется легированностью стали. Поэтому оценку проводили по ряду параметров – толщине слоя Fe_2B и FeB , при этом по толщине сплошного слоя данных фаз и по концам боридных игл и, как указывалось ранее, на двух марках стали и при двух температурных режимах. Все результаты приводили к 3-х балльной системе, т.е. например, выбирали три боридующих смеси с наибольшей толщиной боридного слоя по фазе Fe_2B . Аналогично и по другим параметрам. Если баллы по какому-либо параметру совпадали, то выбирали более технологичную смесь. Результаты всех оценок суммировали.

Итогом решения описанной задачи явилось следующее распределение рангов для исследованной задачи: LiF – 24 балла, AlF_3 – 23, NH_4I – 21, CaF_2 – 19, BaF_2 – 17, NaF – 17, Na_3AlF_6 – 12, KBr – 11, NH_4BF_4 – 5, KBF_4 – 0 баллов.

Литература

1. Маркова Е.В., Никитина Е.П. Математическая теория эксперимента: история, развитие, будущее // Завод. лаб. 2002. Т. 68. №1.
2. Горский В.Г., Орлов А.И. Математические методы исследования: итоги и перспективы // Завод. лаб. 2002. Т. 68. №1.
3. Заводская лаборатория. 2002. Т. 68. №1.
4. Новик Ф.С., Ворошнин Л.Г., Протасевич Г.Ф. Применение математических методов планирования экспериментов при решении задач химико-термической обработки // Металлургия. Сер. «Металловедение и термическая обработка металлов». Мн.: Выш. шк., 1970. Вып. 1.
5. Протасевич Г.Ф. Математические методы планирования эксперимента в химико-термической обработке // Перспективы развития поверхностного и объемного упрочнения сплавов. Мн., 2004.
6. Ворошнин Л.Г., Протасевич Г.Ф. Изобретательская работа в области химико-термической обработки металлов // МиТОМ. 1988. №5.
7. Новик Ф.С. Математические методы планирования экспериментов в металлвоведении. М.: МиСиС, 1979.