

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОРОШКОВЫХ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Для получения прогнозов на основе проведенного анализа данных используется комплекс поддержки принятия решений, включающий оболочку экспертной системы и базу знаний, обеспечивающий в диалоговом режиме принятие решений на основе концентрации известных на данный момент времени знаний.

Ключевые слова: порошковая металлургия, экспертная система, база знаний, математическая статистика, регрессионный, факторный и кластерный анализ.

Методы порошковой металлургии (ПМ) все шире внедряются в практику изготовления изделий самого различного назначения и охватывают многие отрасли, так как они обеспечивают получение готовых изделий, практически не требующих дальнейшей механической обработки.

Наиболее характерные особенности порошковых сталей, которые затрудняют использование известных технологических режимов и приемов термохимической обработки литых и кованных сталей, – это их пониженная теплопроводность, химическая неоднородность, дефектность кристаллического строения, пористость.

Термическая обработка спеченных изделий приводит к повышению прочностных характеристик, в то же время она имеет ряд существенных особенностей, обусловленных наличием пористости и неравновесностью структурного состояния. Все это указывает на сложность рассматриваемых процессов и упрощение исследований с повышением достоверности результатов, что позволяет использовать экспертную систему (ЭС) [1, 2].

Целью экспертной системы изделий порошковой металлургии (ЭС ИПМ) является: прогнозирование конечного значения твердости (НВ) и прочности, а также других эксплуатационных характеристик ИПМ на основании заданных конструкторско-технологических параметров.

Основой ЭС ИПМ является база знаний (БЗ), состоящая из фактов, выявленных при анализе данных о свойствах ИПМ. Каждый факт представляется в виде правил с указанием сущности выявленной закономерности и степени ее влияния на свойства ИПМ.

Данные представлены в виде таблиц экспериментов, отражающих зависимость твердости, пластичности и прочности рассматриваемых изделий от их состава и режимов термообработки.

Состав изделия характеризуется пятью факторами: содержанием в железе (основа) углерода, меди, никеля, хрома и пористостью. Термическая обработка характеризуется температурой нагрева изделия под закалку, скоростью охлаждения и температурой отпуска. При этом для выявления существующих закономерностей в опытных данных предполагается использовать методы математической статистики (регрессионный, факторный и кластерный анализ) и методы интеллектуального анализа данных, с помощью которых будут сформированы правила БЗ.

Важным этапом создания ЭС является ее тестирование для проверки сходимости получаемых результатов. Тестирование проводят по опытным данным, при этом отклонение полученных результатов от опытных данных должно быть на порядок меньше точности задания опытных данных.

ЭС ИПМ позволит прогнозировать технические параметры производимых ИПМ, сократить время принятия решений при выборе материалов, обладающих требуемыми свойствами, сократить затраты, связанные с испытаниями и получением информации о технико-эксплуатационных характеристиках ИПМ.

Для анализа данных использовали систему Statistica [4]. Перед этим была проведена проверка данных на целостность и избыточность с помощью СУБД Access. Также с помощью Access были сформированы выборочные БД, отражающие последствия изменения одного из исходных параметров при постоянстве остальных. В системе Statistica были исследованы:

- корреляционные зависимости между исходными и выходными параметрами ИПМ;
- выделены кластеры исходных параметров;
- исследовано влияние независимых переменных на конечные свойства ИПМ;

– проведено ранжирование факторов;
 – проведены регрессионные исследования полученных зависимостей выходных параметров от независимых факторов.

Основным регулирующим и управляющим фактором, определяющим механические свойства ИПМ при правильно выбранных режимах с учетом особенностей структурного состояния, деформации, нагрева и охлаждения пористых тел, является термическая обработка изделий из порошковых сталей.

Для решения многокритериальных задач по оптимизации режима термообработки (закалки и отпуска) используются следующие подходы [5]:

1. Ранжировка (упорядочение) факторов, их объединение в группы и сведение решения многокритериальной задачи к решению по одному выбранному фактору.

2. Формирование моделей многокритериальных ситуаций и ранжирование этих моделей по заданному фактору.

Принята следующая последовательность действий: анализ и разработка структуры системы с оценкой линейности или нелинейности зависимостей варьируемых переменных.

На первом этапе проверяли полученные характеристики вариационных рядов значений по переменным и результаты опытов по критерию χ^2 -квадрат гипотезы о нормальности исходной выборки. Результаты исследования показали, что исходные распределения значимо отличаются от нормального критического значения χ^2 -квадрат, которое по всем переменным составляет – 12,60 [6] (табл. 1). Число степеней свободы во всех случаях равно 6, уровень значимости принят равным 0,05 (доверительная вероятность – 95%), а наблюдаемые значения χ^2 изменяются в широком диапазоне от 15,12 для выходного параметра – твердости до 1498,32 для независимой переменной – содержания хрома.

Таблица 1. Сводная таблица результатов проверки по критерию χ^2 -квадрат

Переменные						
	SOD_C*	SOD_CU*	SOD_CR*	SOD_NI*	PORIS*	T_NZ*
χ^2 кв.набл	312,12	1042,27	1498,31	1198,82	271,55	111,32
Переменные						
	V_OHL*	T_OTP*	TVERD*	UDLIN*	BALL*	KOD_MAT*
χ^2 кв.набл	474,36	61,97	15,12	602,74	51,41	173,39

* принятые обозначения: SOD_C – содержание углерода; SOD_CU – содержание меди; SOD_CR – содержание хрома, SOD_NI – содержание никеля; PORIS – пористость; T_NZ – температура нормализации, закалки; V_OHL – скорость охлаждения; T_OTP – температура отпуска; TVERD – твердость; UDLIN – удлинение; BALL – балл; KOD_MAT – код материала.

Таблица 2. Сводная таблица оценок степени влияния предикторов на выходные параметры (отклики)

Предикторы		Зависимые переменные (отклики)			
		PORIS	TVERD	UDLIN	BALL
№	название	вклад	вклад	вклад	вклад
2	SOD_C	-0,42	0,29	-0,22	0,11
3	SOD_CU	-0,005	-0,03	-0,03	-0,11
4	SOD_CR	-0,01	-0,01	0,002	-0,03
5	SOD_NI	0,004	0,005	0,018	0,005
7	T_NZ	0,46	-0,62	-0,66	-0,52
8	V_OHL	0,008	0,02	0,005	-0,07
9	T_OTP	-0,01	-0,007	-0,05	0,06
13	KOD_MATE	0,06	-0,002	0,002	-0,07

Факторный анализ данных о физических, механических и технологических характеристиках образцов из порошковых материалов позволил определить вклад каждого из технологических параметров в качественные характеристики, т. е. вклады предикторов (аргументов) в переменную отклика (зависимую переменную), результаты в табл. 2.

Приведенные результаты отражают воздействие всей системы предикторов на тот или иной отклик. Приведенные оценки позволили выделить указанные предикторы (жирный шрифт) и сосредоточить внимание исследователя на этих характеристиках.

В этих условиях построение моделей и зависимостей, основанных на линейных отношениях, не имеет перспективы, поскольку ошибки будут значительными. Поэтому на данном этапе проводим оценки парных и комбинированных воздействий, позволяющих определить и выделить особенности комплексного взаимодействия переменных, сначала парные, затем более сложные – комбинированные.

Взаимозависимости парных переменных выявляются при рассмотрении корреляционной табл. 3, на которой представлены значимые (уровень значимости ($p < 0,05$)) корреляционные функции.

Корреляционные зависимости помогают выявить степень взаимовлияния изменения содержания компонентов или технологических параметров на механические характеристики изделий из порошковых материалов.

По знаку корреляционного коэффициента в таблице 3 можем судить о направлении взаимодействия (усиливающее при знаке плюс (+) или ослабляющее при

знаке минус (-), на основании анализа таблицы можно заключить о влиянии переменных в рассматриваемой системе:

- наиболее сильные парные зависимости наблюдаются между процентным содержанием хрома и меди (-0,77), хрома и углерода (-0,61) (имеющие отрицательный знак);

- несколько меньшие взаимодействия – между процентным содержанием меди и углерода (0,47), пористостью и содержанием хрома (-0,39), пористостью и содержанием меди (0,38), пористостью и содержанием никеля (0,35) (имеющие положительный знак).

Наиболее сильное влияние (максимальная корреляция) отмечена между содержанием углерода и удлинением (показателем пластичности), содержание меди серьезно влияет на пористость, содержание хрома и никеля – на пористость, твердость и удлинение.

Корреляционные коэффициенты влияния технологических режимов на пластические свойства следующие: температура нормализации (-0,27), скорость охлаждения (-0,16).

Можно с уверенностью говорить о том, что на пористость содержание углерода меньше влияет, чем содержание хрома, меди, никеля (0,22 против 0,38), причем влияние меди положительное (0,38), а хрома – отрицательное (-0,39).

Технологические режимы влияют следующим образом: температура закалки (0,21) и скорость охлаждения (0,24) оказывают положительное влияние (твердость увеличивается), температура отпуска (-0,47) – отрицательное.

На пластические свойства (удлинение образцов под действием растягивающих нагрузок) влияние одинаково положительное, содержание углерода влияет максимально (0,37), а никеля и хрома – практически одинаково (0,24), что подтверждает практические данные: чем больше углерода, тем более хрупким является образец же-

лезоуглеродистых материалов. Такой же эффект (увеличение пластичности) наблюдается при увеличении скорости охлаждения, снижении температуры закалки или при повышении содержания хрома и никеля.

Для наглядного представления влияния пар переменных на механические характеристики использовали графики парного влияния процентного содержания компонентов на твердость образцов из порошковых материалов [6] (рис. 1, 2).

Анализ приведенных графических зависимостей, имеющих седловидный характер, позволяет определить сложное совместное влияние различных составов порошковых материалов и параметров технологических воздействий на контролируемые физические и механические характеристики изделия.

Корреляционный коэффициент содержания углерода и меди равный – 0,47, однонаправленно воздействуют на твердость образца. Это подтверждается графиком на рисунке 1а. При содержании углерода 1,5% и меди 2,5% наблюдается максимальная твердость. При содержании углерода 0,3% увеличение содержания меди снижает твердость образца. При содержании меди 2,5% уменьшение содержания углерода (с 1,5% до 0,3%) приводит к снижению твердости больше чем в два раза (480–220 НВ). Минимальное значение твердости образцов (200 НВ) наблюдается при содержании углерода около 0,7%, незначительно увеличивается при увеличении содержания меди и достигает 230 НВ.

Максимальное содержание хрома (3,5%) и минимальное содержание углерода характеризуется твердостью менее 320 НВ, а при увеличении содержания углерода (с 0,2% до 1,5%) – 350 НВ. Максимальная твердость соответствует содержанию углерода 1,5% и хрома от 1,0 до 2,4%. Увеличение содержания хрома от 0,3 до 3,5% нелинейно увеличивает твердость от 100

Таблица 3. Корреляционные зависимости в БД «ПМ»

	C	Cu	Cr	Ni	PORIS	T_NZ	V_OHL	T_OTP	TVERD	UDLIN	BALL
C	1,0	0,47	-0,61		0,22	0,14	0,19	0,16	-	-0,37	-0,14
Cu	0,47	1,0	-0,77	0,22	0,38	0,14	0,12	-	-	-	-
Cr	-0,61	-0,77	1,0	-0,22	-0,39	-0,26	-0,14	-	-0,11	0,23	-0,11
Ni	-	0,22	-0,22	1,0	0,35	0,15	-0,15	-	0,21	0,24	-
PORIS	0,22	0,38	-0,39	0,35	1,0	-	-	-	-0,17	-	-0,51
T_NZ	0,14	0,14	-0,26	0,15	-	1,0	-	-	0,21	-0,27	-
V_OHL	0,19	0,12	-0,14	-0,15	-	-	1,0	-	0,24	-0,16	-
T_OTP	0,16	-	-	-	-	-	1,0	-	0,24	-0,16	-
TVERD	-	-	-0,11	0,21	-0,17	0,21	0,24	-0,47	1,0	-	0,14
UDLIN	-0,37	-	0,23	0,24	-	-0,27	-0,16	-	-	1,0	0,17
BALL	-0,14	-	-0,11	-	-0,51	-	-	-	0,14	0,17	1,0

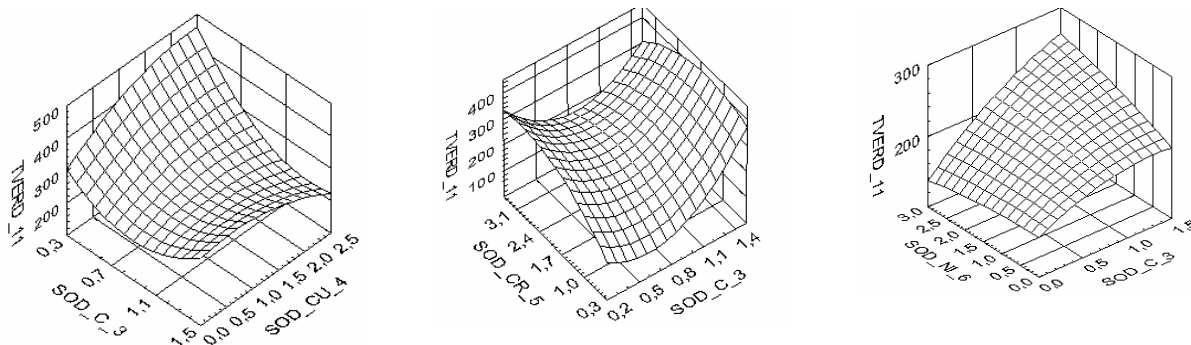


Рисунок 1. Зависимость твердости (TVERD) от содержания углерода (SOD_C) и меди (SOD_CU) (а), хрома (SOD_CR) (б) никеля (SOD_Ni) (в) в %

до 320 НВ. Заметное снижение твердости происходит при содержании углерода 0,5–0,8% – «седловина». Влияние процентного содержания хрома (от 0,3 до 3,5%) на твердость незначительно, она практически не изменяется.

Согласно данным таблицы 3 значимой корреляции между содержанием углерода и никеля не наблюдается, можно предположить, что они практически независимо влияют на твердость. Однако график показывает, что согласование есть: повышение содержания никеля при возрастании содержания углерода приводит к значительному росту твердости, почти на 70 единиц НВ. Этот пример показывает, что влияние пары независимых переменных может быть ошибочно истолковано как согласованное воздействие, хотя причины такого поведения иные, чем мы предполагаем. На основании этого можно сделать вывод, что графическому анализу должен предшествовать анализ корреляционных коэффициентов. Это помогает избежать ложного, необоснованного толкования графиков.

На рисунке 2 приведен трехмерный график согласованного влияния переменных: содержание хрома (SOD_CR) и температура закалки (T_NZ). Корреляционный коэффициент значим, равен -0,26. Повышение содержания хрома незначительно снижает значения твердости на всем наблюдаемом интервале температур. Провал твердости «седловина» наблюдается в зоне перехода от температур нормализации к закалочным температурам.

Для уточненной идентификации зависимости был проведен кластерный анализ, позволяющий разбить исследуемое множество параметров процесса производства ИПМ на несколько кластеров. Отнесение точки к тому или иному кластеру происходит на основе меры близости, соответствующей расстоянию точки до центра кластера. Выберем K произ-

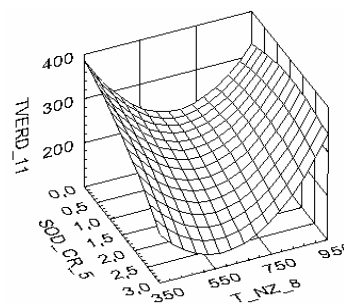


Рисунок 2. Зависимость твердости от температуры закалки и содержания хрома (SOD_CR)

вольных центров в пространстве переменных, для разбиения записей на соответствующее количество кластеров. Число разбиений $K = 2$ (таблица 4). В первый кластер системой выделены переменные: X6 – температура нагрева под закалку $T_{н.з.} = 750..900$ °С, X7 – скорость охлаждения $V_{охл.} = 200..800$ °С.

Во второй объединены переменные: X1 – содержание углерода $C = 1,0..1,5\%$, X2 – содержание меди $Cu = 0..2,5\%$, X3 – содержание хрома $Cr = 0..3,0\%$, X4 – содержание никеля $Ni = 0..3,0\%$, X5 – пористость (количество пор, %) = 10..20%, X8 – температура отпуска $T_{отп.} = 150..300$ °С.

При увеличении числа разбиений $K=3$ выделяются следующие кластеры (таблица 4):

Первый кластер – переменные: X6 – температура нагрева под закалку $T_{н.з.} = 750..900$ °С, X7 – скорость охлаждения $V_{охл.} = 200..800$ °С.

Второй кластер: X8 – температура отпуска $T_{отп.} = 150..300$ °С.

Третий кластер: X1 – содержание углерода $C = 1,0..1,5\%$, X2 – содержание меди $Cu = 0..2,5\%$, X3 – содержание хрома $Cr = 0..3,0\%$, X4 – содержание никеля $Ni = 0..3,0\%$, X5 – пористость Пор = 10..20%.

На основе результатов разбиения множества параметров на два кластера проведем регрессионное исследование и определим влияние

параметров каждого кластера на формирование свойств ИПМ.

Линейная аппроксимация:

Кластер 1:

$$HB = 0,18 \cdot T_{н.з.} + 0,21 \cdot V_{оох.} - 0,46 \cdot T_{отп.}$$

Кластер 2:

$$HB = -0,11 \cdot C - 0,35 \cdot Si - 0,45 \cdot Cr + 0,30 \cdot Ni - 0,32 \cdot P$$

Коэффициент детерминации при линейном оценивании:

Кластер 1 $R = 0,55$. Кластер 2 $R = 0,44$.

Полученная зависимость при линейной аппроксимации малозначима.

Нелинейное оценивание:

Кластер 1:

$$HB = 118,77 + 0,09 \cdot T_{н.з.} + 0,01 \cdot V_{охл.} - 0,03 \cdot T_{отп.}$$

Кластер 2:

$$HB = 243,9 - 6,45 \cdot C - 16,55 \cdot Si - 21,27 \cdot Cr + 9,98 \cdot Ni - 0,99 \cdot P$$

Коэффициент детерминации при нелинейном оценивании:

Кластер 1 $R = 0,85$. Кластер 2 $R = 0,84$.

Таблица 4. Кластеры и дистанции до центров кластеризации

Переменные							
Кластер 1		Кластер 2				Кластер 3	
X6	X7	X1	X2	X3	X4	X5	X8
Дистанция							
185,50	185,50	55,73	55,17	56,57	56,13	40,35	263,45

Значение коэффициента детерминации при нелинейной аппроксимации указывает на значительную адекватность представленной модели. Следовательно, она может использоваться при формировании базы знаний ЭС ИПМ.

Для получения прогнозов на основе проведенного анализа данных используется комплекс поддержки принятия решений, включающий оболочку экспертной системы и базу знаний, обеспечивающий в диалоговом режиме принятие решений на основе концентрации известных на данный момент времени знаний.

26.11.2010 г.

Список использованной литературы:

1. Сафонов В.О. Экспертные системы – интеллектуальные помощники специалистов. – СПб.: Санкт-Петербургская организация общества «Знания» России, 2002.
2. Оптимизация процессов термической обработки порошковых сталей // Программа №2008614187 заявка №208612544. Непша А.А., Северюхина Н.А.
3. Боровиков В.П. // STATISTICA: Искусство анализа данных на компьютере. Для профессионалов. – СПб.: Питер, 2001. – С. 656.
4. Сахаров А.А. Концепции построения и реализации информационных систем, ориентированных на анализ данных // Системы управления базами данных, 2002, N4, С. 55-70.
5. Вергинская Н.Д. Математическое моделирование многофакторных и многопараметрических процессов в многокомпонентных системах. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2000. – С. 286.
6. Influence of composition and processing mode on the physical and mechanical properties of powder materials / Bogodukhov S.I., Nguen H.L., Severyukhina N.A. // Journal of science and technology technical universities. – Hanoi: HUT, 2009. – ISSN 0868-3980. 2009, #72, P. 48-51.

Сведения об авторах:

Богодухов Станислав Иванович, заведующий кафедры материаловедение и технология материалов Оренбургского государственного университета, доктор технических наук, профессор

Проскурин Александр Дмитриевич, доцент кафедры материаловедения и технологии материалов, проректор по учебной работе Оренбургского государственного университета, кандидат технических наук, доцент, тел. (3532)773888, e-mail: aproskurin@mail.osu.ru

Северюхина Наталия Александровна, старший преподаватель кафедры материаловедение и технология материалов Оренбургского государственного университета 460018, Оренбург, пр-т Победы, 13, (3532)372511, e-mail: matm@mail.osu.ru

UDC 621.762

Bogodukhov S.I., Proskurin A.D., Severyukhina N.A.

DESIGN OF EXPERT SYSTEM FOR PRODUCTS MADE OF POWDER LOW ALLOY STEEL

To obtain the predictions based on analysis of data the complex decision support is used, including expert system shell and knowledge base, providing on-line decision-making on the basis of concentration of knowledge at the present time.

Key words: powder metallurgy, expert system, knowledge base, mathematical statistics, regression, factor and cluster analysis.