



УДК 519.21

© 2009

В. И. Большаков, Ю. И. Дубров, Е. Ю. Жевтило

### **Эмпирическое прогнозирование качественных характеристик материала на предпроектной стадии его создания**

*(Представлено академиком НАН Украины М. И. Гасиком)*

*Показується можливість синтезу математичної моделі технології виробництва сталі, який здійснюється на основі даних, одержаних емпіричним шляхом. Такий підхід дозволяє здійснити гіпотетичне прогнозування механічних властивостей матеріалу, що проектується.*

При современном уровне экономической и научно-технической поддержки производства перед разработчиками новых и совершенствовании действующих технологий стоят задачи выбора такого хода технологического процесса, при котором удовлетворялись бы все требования к качеству целевого продукта при минимизации его возможных потерь. Например, в практике производства стали с заданными механическими свойствами часто наблюдается ситуация, при которой даже незначительные изменения процентного содержания компонент или незначительные отклонения от заданного технологического режима приводят к относительно большим изменениям ее механических свойств. Данный факт лишний раз подтверждает известный постулат теории катастроф, согласно которому для сложных систем относительно малые изменения одного из определяющих параметров могут привести систему к “катастрофе” [1]. До настоящего времени предсказания подобных явлений базировались, в основном, на специально поставленных экспериментах, что приводило к относительно большим временным и материальным затратам. Во избежание этого, нами предлагается применение эмпирического прогнозирования, которое базируется на информации, являющейся откликами экспертов (специалистов в заданной предметной области) на поставленные по специально сформированному плану вопросы. В качестве плана, по которому формируются вопросы к экспертам, предлагается рассматривать строки матрицы планирования [2], каждая из которых, представляет исходные данные для проведения экспертом мысленного опыта (например, в каждой строке матрицы указывается процентное содержа-

ние компонент металла и технологический режим его производства) с предсказанием им результатов этого опыта, в частности, в виде численного значения какого-либо механического свойства, присущего исследуемому металлу. Такой подход позволяет получать гипотетические уравнения, описывающие, например, зависимость механических свойств стали от управляемых переменных, с их прогнозированием.

В дальнейшем применение такого способа эмпирического прогнозирования может являться исходным для решения многокритериальной задачи с качественно неоднородными критериями [3].

Для проверки работоспособности и эффективности предлагаемого способа эмпирического прогнозирования была выбрана технология производства стали 35ХМ, которая применяется для изготовления валов, шестерней, фланцев, дисков, штоков и других деталей, работающих в условиях больших нагрузок и скоростей при температурах 450–500 °С. Управляемые переменные для этой марки стали приведены в матрице (табл. 1)<sup>1</sup>, где для каждой из них также приведены: основной уровень (ОУ); интервал варьирования (ИВ); верхний уровень (ВУ) и нижний уровень (НУ).

Поскольку матрица планирования представлена строками, каждая из которых — это конкретный мысленный опыт, эксперту предлагалось проставить в каждой строке этой матрицы вероятные численные значения критериев из заданного диапазона их возможных значений, где  $Y_1$  — предел текучести;  $Y_2$  — предел прочности;  $Y_3$  — относительное удлинение;  $Y_4$  — относительное сужение;  $Y_5$  — ударная вязкость;  $Y_6$  — твердость по Бринеллю. Экспертам предлагалось оценить влияние каждой управляемой переменной на конкретное механическое свойство стали 35ХМ по шкале от 0 до 1. Самое большое влияние переменной оценивалось как  $-1^2$ . В табл. 2 представлены усредненные оценки, которые дали три независимых эксперта. При этом результаты экспертизы, которые можно было отнести к сомнительным, из анализа исключались [4]. Достоверность этих результатов определялась программой, в которую был заложен алгоритм нахождения так называемой  $\varepsilon$ -полосы. В  $\varepsilon$ -полосу попадают близкие к равным оценки, которые из анализа исключались (см., напр., [4]). В помощь экспертам введена подсказка (см. табл. 2), в которую включены теоретические предпосылки, поясняющие механизм влияния переменных на механические свойства исследуемой стали (см., напр., [5–7]). Полученная от экспертов гипотетическая степень влияния управляемых переменных на механические свойства стали 35ХМ учитывалась при определении численных значений этих свойств в каждой строке матрицы (см. табл. 1, столбцы 8, 10, 12, 14, 16, 18).

Для проверки точности предсказания из данных, характеризующих работу исследуемого технологического режима за относительно большой промежуток времени, были выбраны такие, которые оказались относительно близкими к нескольким строкам матрицы (табл. 1, строки 2, 7, 14), результаты которых записаны в столбцах 9, 11, 13, 15, 17, 19. Приведенные значения механических свойств для изделий из стали 35ХМ получены после термообработки, а конкретно — после закалки (850°), отпуска (560°) (ГОСТ 8479–70).

Относительная сходимость нескольких прогнозируемых значений механических свойств стали 35ХМ с результатами пассивных экспериментов показывает работоспособность предлагаемого способа гипотетического прогноза, который желательно применять на предпро-

---

<sup>1</sup>Исходные данные для данной задачи получены на Днепропетровском заводе ОАО «ДНЕПРОТЯЖ-МАШ», где также проводились пассивные эксперименты.

<sup>2</sup>В дальнейшем эти оценки нормируются.

Таблиця 1

ОУ		0,36	0,27	0,55	0,95	0,2	0,2	НВ, МПа		G <sub>0,2</sub> , МПа		G <sub>B</sub> , Мпа		δ, %		ψ, %		КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	
ИБ		0,04	0,1	0,15	0,15	0,05	0,1												
ВУ		0,40	0,37	0,7	1,1	0,25	0,3												
НУ		0,32	0,17	0,4	0,8	0,15	0,1												
Принятые обозначения		С, %	Si, %	Mn, %	Cr, %	Mo, %	Ni, %												
Код	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	Y <sub>1ст</sub>	Y <sub>1эксп</sub>	Y <sub>2ст</sub>	Y <sub>2эксп</sub>	Y <sub>3ст</sub>	Y <sub>3эксп</sub>	Y <sub>4ст</sub>	Y <sub>4эксп</sub>	Y <sub>5ст</sub>	Y <sub>5эксп</sub>	Y <sub>6ст</sub>	Y <sub>6эксп</sub>
№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	+	+	+	+	+	+	+	244,65		617,66		736,88		15,67		42,89		88,96	
2	+	+	+	+	-	+	+	221,03	229	414,84	625	573,13	597	14,61	17	30,46	34	86,86	78
3	+	+	+	-	+	+	-	224,54		562,34		655		13,02		40,41		80,43	
4	+	+	+	-	-	+	-	210,92		459,53		591,25		11,95		37,97		75,32	
5	+	+	-	+	+	-	+	205,56		422,66		627,5		10,05		35,03		81,61	
6	+	+	-	+	-	-	+	212,38		419,84		563,75		9,98		42,60		79,5	
7	+	+	-	-	+	-	-	230,89	239	497,34	520	645,63	720	15,39	14	58,54	64	91,07	85
8	+	+	-	-	-	-	-	207,47		464,53		481,88		8,33		13,11		88,96	
9	+	-	+	+	+	-	-	197,33		533,28		591,25		15,67		42,89		61,11	
10	+	-	+	+	-	-	-	194,30		430,47		597,5		14,61		30,46		79	
11	+	-	+	-	+	-	+	210,81		577,97		609,38		13,02		40,41		82,57	
12	+	-	+	-	-	-	+	208,78		475,16		445,63		11,95		27,97		78,46	
13	+	-	-	+	+	+	-	219,68		522,03		655,63		15,67		55,89		101,6	
14	+	-	-	+	-	+	-	233,78	241	585,05	575	781,88	750	14,61	16	47,46	53	79,5	87
15	+	-	-	-	+	+	+	213,16		256,72		563,75		13,02		40,41		91,07	
16	+	-	-	-	-	+	+	206,87		246,09		431,11		11,95		27,97		88,96	

Таблица 2

Влияние управляемой переменной на механические свойства стали 35ХМ	Принятая экспертами степень влияния управляемых переменных на механические свойства стали при увеличении этих переменных в пределах заданных границ					
	НВ	$G_{0,2}$	$G_B$	$\delta$	$\psi$	KCU
Повышение содержания углерода в стали приводит к повышению ее твердости. Влияние углерода проявляется в изменении механических свойств сталей. Структура стали после медленного охлаждения состоит из двух фаз — феррита и цементита. Содержание цементита в ней прямо пропорционально содержанию углерода в сплаве. Поскольку феррит пластичен, а цементит тверд и хрупок, прочность и твердость стали с ростом содержания углерода растут. При содержании углерода выше 1% прочность стали вновь начинает снижаться, так как выделяющийся на границах зерен вторичный цементит образует сплошную сетку, которая становится очагом хрупкого разрушения из-за концентрации напряжений на границах зерен	0,5	0,25	0,25	-0,25	-0,25	-0,5
Увеличение процентного содержания марганца в стали повышает ее механические свойства, особенно упругие, а также повышает ее твердость. С другой стороны, содержание марганца в стали увеличивает ее хрупкость. Все это действительно при содержании марганца не более 1,5%	0,2	-0,4	0,2	0,2	0,2	0,4
Увеличение процентного содержания никеля в стали увеличивает ее прокаливаемость, жаропрочность и жаростойкость, уменьшает хрупкость, измельчает зерно, способствуя повышению пластичности и вязкости, а также увеличивает ее твердость	-0,3	-0,3	0,3	0,3	0,2	0,2
Повышение процентного содержания хрома в стали повышает ее стойкость к отпуску, прокаливаемость, а также окалиностойкость; способствует увеличению хрупкости при отпуске, что приводит к снижению твердости	-0,5	0,5	0,2	0,2	0,1	0,3
Молибден — это сильный карбидообразователь, который снижает критическую скорость закалки стали, повышая ее прокаливаемость даже при содержании молибдена 0,5...0,8%. Он измельчает зерно, увеличивает вязкость, стойкость к отпуску, снижает ползучесть и хрупкость при отпуске, что обуславливает увеличение ее твердости	0,15	0,15	0,3	0,3	-0,3	0,2
Процентное содержание кремния в стали способствует ее графитизации, понижает чувствительность к закалке и повышает стойкость к отпуску, износостойкость, упругость, а, следовательно, повышает ее твердость [7]	0,2	0,2	0,15	0,15	0,3	0,4

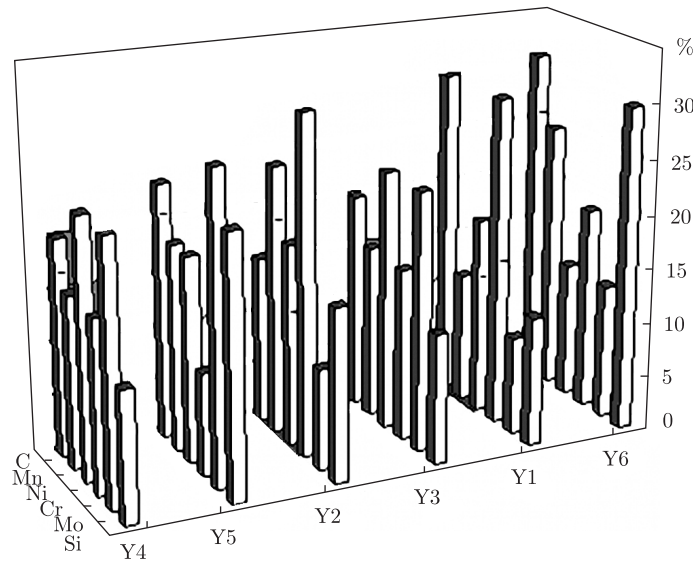


Рис. 1

ектной стадии формирования той или иной технологии. Так, например, для технологии производства стали 35ХМ были получены уравнения (1)–(6) описывающие зависимости механических свойств данной марки стали как функции управляемых переменных. Анализ этих уравнений позволил построить суммарную гистограмму (рис. 1), показывающую гипотетическое влияние каждой управляемой переменной на показатели механических свойств стали 35ХМ, что в дальнейшем делает возможным определение области “компромисса” критериев многокритериальной задачи [3]

$$Y_1 = 124X_0 + 37,576X_1 + 15,030X_2 + -22,545X_3 - 37,576X_4 + 11,273X_5 + 15,030X_1X_5, \quad (1)$$

$$Y_2 = 290,937X_0 + 38,281X_1 - 61,250X_2 - 45,938X_3 + 76,563X_4 + 22,969X_5 - 61,250X_1X_5, \quad (2)$$

$$Y_3 = 327,5X_0 + 65,500X_1 + 52,400X_2 + 78,600X_3 + 52,400X_4 + 78,600X_5 + 52,400X_1X_5, \quad (3)$$

$$Y_4 = 10,560X_0 - 1,600X_1 + 1,280X_2 + 1,920X_3 + 1,280X_4 + 1,920X_5 + 1,280X_1X_5, \quad (4)$$

$$Y_5 = 31,071X_0 - 5,357X_1 + 4,286X_2 + 4,286X_3 + 2,143X_4 + 6,429X_5 + 4,286X_1X_5, \quad (5)$$

$$Y_6 = 36,875X_0 - 9,219X_1 + 7,375X_2 + 3,687X_3 + 5,531X_4 + 3,687X_5 + 7,375X_1X_5. \quad (6)$$

1. *Постон Т., Стюарт И.* Теория катастроф и ее приложения. – Москва: Мир, 1980. – 780 с.
2. *Налимов В. В., Чернова Н. А.* Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. – Москва: Наука, 1965. – 340 с.
3. *Большаков В. И., Дубров Ю. И.* Решение многокритериальной задачи металловедения с качественно неоднородными критериями // Доп. НАН України. – 2002. – № 3. – С. 190–197.
4. *Дубров Ю. И., Путилов В. М., Тарханов В. К.* Об одном методе повышения согласованности экспертной оценки. – Пермь: НИИ управляющих машин и систем, 1988. – С. 36–45.

5. Гуляев А. П. Металловедение: Учебник для высших учебн. заведений. – 5-е изд., перераб. и доп. – Москва: Металлургия, 1978. – 648 с.
6. Позняк Л. А. Инструментальные стали. – Киев: Наук. думка, 1996. – 488 с.
7. Дурнев В. Д., Сапунов С. В., Федюкин В. К. Экспертиза и управление качеством промышленных материалов. – СПб.: Питер, 2004. – 254 с.
8. Пинчук Л. С., Струж В. А., Мышкин Н. К., Свириденюк А. И. Материаловедение и конструкционные материалы. – Минск: Выш. шк., 1989. – 461 с.

Приднепровская государственная академия  
строительства и архитектуры, Днепропетровск

Поступило в редакцию 01.08.2008

**V. I. Bol'shakov, Yu. I. Dubrov, E. Yu. Zhevtilo**

### **Empirical forecasting of qualitative characteristics of a material on the preprojecting stage**

*This article shows a possibility of the synthesis of a mathematical model of steel production technology which is implemented on the basis of empirical data. Such an approach gives opportunity of making the hypothetical forecast of mechanical properties of a material that is projected.*