

Д. Ф. Чернега, В. Н. Рыбак

Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев

## Обработка результатов двухфакторного эксперимента металлургического процесса при помощи программы Microsoft Excel 2010

Предложена методика обработки результатов двухфакторных экспериментов при помощи программы Microsoft Excel 2010. На примере легирования алюминия медью и кремнием рассмотрены этапы расчета двухфакторной математической модели в программе MS Excel 2010. При этом, используя всего одну программу, за относительно короткое время удалось выполнить целый комплекс расчетов двухфакторного эксперимента, а именно: определить средние значения откликов каждой точки и их доверительные интервалы; выбрать вид математической модели и рассчитать ее коэффициенты; упростить математическую модель, рассчитав значимость каждой из функций, которые входят в ее состав; проверить математическую модель на адекватность; провести оптимизацию математической модели и прогнозирование при ее помощи; построить двумерную графическую зависимость процесса. Приведенную методику обработки результатов двухфакторного эксперимента могут использовать отечественные исследователи и специалисты для обработки результатов любых двухфакторных экспериментов металлургических и неметаллургических процессов.

**Ключевые слова:** двухфакторный эксперимент, Microsoft Excel 2010, математическая модель, доверительный интервал, адекватность, оптимизация, прогнозирование, график

**Введение.** Данная работа является продолжением работы [1] и посвящена этапам построения двухфакторных математических моделей при помощи программы MS Excel 2010.

Как было показано в работе [1], основная задача любого научного исследования состоит в том, чтобы на основе экспериментальных данных некоторого процесса получить формулу (математическую модель), которая наилучшим образом описывала бы данный процесс.

Двухфакторная математическая модель представляет собой зависимость одного отклика (зависимого параметра) от двух факторов (независимых параметров) при постоянности других факторов (параметров). Например: зависимость относительного удлинения сплава от количества введенного в расплав модификатора и времени выдержки при постоянной температуре модифицирования, температуре разлива и т. д.

**Постановка задачи.** Задача данной работы состоит в ознакомлении отечественных ученых и спе-

циалистов с процедурой обработки результатов двухфакторных экспериментов при помощи программы MS Excel.

В качестве примера обработки результатов двухфакторного эксперимента выбрали процесс легирования алюминиевого расплава двумя химическими элементами – медью и кремнием. Экспериментально полученные зависимости временного сопротивления разрыву алюминиевого сплава от количества введенных в расплав элементов приведены в таблице, по которой видно, что количество экспериментальных точек равно 8, а количество параллельных исследований для разных точек меняется от 3 до 5. Ошибка измерения у разрывной машины, при помощи которой проводили исследования временного сопротивления разрыву, составляла  $\pm 3\%$  (при доверительной вероятности 95 %).

**Цель работы** – построить математическую модель данного металлургического процесса, проверить ее на адекватность, упростить в случае необходимости и возможности, вычислить оптимальные

### Результаты исследований

Параметр	Обозначение	Номер опыта								
		1	2	3	4	5	6	7	8	
Содержание, %: меди кремния	$X_1$	0,2	0,5	0,8	1,0	1,5	1,7	1,3	2,0	
	$X_2$	4,2	3,0	3,5	4,0	5,5	5	6,3	4,0	
Временное сопротивление разрыву, МПа	1	$Y_1$	154	169	172	163	181	185	176	192
	2	$Y_2$	151	165	173	158	183	–	172	190
	3	$Y_3$	158	173	176	157	–	181	179	197
	4	$Y_4$	–	–	168	169	–	189	173	188
	5	$Y_5$	153	–	–	–	178	183	–	189

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R		
1																				
2		Исходные данные:																		
3		Общее количество экспериментальных точек:											8	←=СЧЁТ(J8:J15)						
4		Доверительная вероятность Р, %:											95							
5		Уровень значимости α:											0,05	←=(1-L4/100)						
6																				
7		№	X1	X2	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y	Количество параллельных исследований	Относительная ошибка СИ, %	Абсолютная ошибка СИ, МПа	Стандартное отклонение СВ, МПа	Доверительный интервал СВ, МПа	Доверительный интервал РИ, МПа	Нижняя граница, МПа	Верхняя граница, МПа		
8		1	0,2	4,2	154	151	158		153	154	4	3	4,62	2,943920289	2,884988887	5,446793624	148,553	159,447		
9		2	0,5	3	169	165	173			169	3	3	5,07	4	4,526342936	6,796519725	162,203	175,797		
10		3	0,8	3,5	172	173	176	168		172,25	4	3	5,1675	3,304037934	3,237897677	6,098117547	166,152	178,348		
11		4	1	4	163	158	157	169		161,75	4	3	4,8525	5,5	5,389900957	7,252433287	154,498	169,002		
12		5	1,5	5,5	181	183			178	180,67	3	3	5,42	2,516611478	2,847761647	6,122593111	174,544	186,789		
13		6	1,7	5	185		181	189	183	184,5	4	3	5,535	3,415650255	3,347275742	6,468421747	178,032	190,968		
14		7	1,3	6,3	176	172	179	173		175	4	3	5,25	3,16227766	3,098975162	6,096404436	168,904	181,096		
15		8	2	4	192	190	197	188	189	191,2	5	3	5,736	3,563705936	3,123668581	6,531385872	184,669	197,731		
16																				
17																				
18																				
19																				

Рис. 1. Ввод экспериментальных данных в рабочий лист MS Excel 2010

параметры процесса (содержание легирующих элементов, при которых конечный сплав имел бы максимальное значение временного сопротивления разрыву) и построить графическую зависимость временного сопротивления разрыву сплава от количества легирующих элементов.

**Методика проведения расчетов.** Последовательность расчета любой двухфакторной математической модели аналогична однофакторной, приведенной в [1].

**Порядок проведения расчетов.** На новом листе рабочей книги MS Excel 2010 на первом этапе необходимо создать таблицу с экспериментальными данными (рис. 1). Независимые параметры (содержание меди и кремния) обозначены  $X_1$  и  $X_2$ , зависимые (временное сопротивление разрыву) –  $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5$  (по количеству параллельных исследований), а среднее арифметическое (математическое ожидание) –  $Y$ . Еще семь столбцов (относительная ошибка средства измерения – СИ; абсолютная ошибка измерения разрывной машины – СИ; стандартное отклонение случайной величины – СВ; доверительный интервал – СВ; доверительный интервал результатов измерений – РИ; верхняя и нижняя границы) добавлены для расчета относительной ошибки измерения разрывной машины. Далее расчетные формулы введены в ячейки, на которые указывают сплошные

стрелки, которые затем скопированы в ячейки, обозначенные пунктирными стрелками.

На следующем этапе выбирают общий вид математической модели и создают таблицу из набора простых функций, коэффициенты которых необходимо рассчитать (рис. 2). Учитывая то, что количество опытов в данной задаче равно 8, в математической модели можно использовать 7 ( $8 - 1$ ) коэффициентов (один коэффициент используется в качестве свободного члена модели). Так как два коэффициента можно использовать с  $X_1$  и  $X_2$ , остается 5 ( $7 - 2$ ) коэффициентов, которые включают в модель дополнительно, чтобы повысить ее адекватность. Еще 5 дополнительных функций, которые получаются из двух основных ( $X_1$  и  $X_2$ ) добавляют к модели (например,  $X_1 \cdot X_2, X_1^2, X_2^2, X_1^3, X_2^3$ ). Далее в соответствующие ячейки набирают формулы расчета простых функций и копируют их для всех 8 точек.

Затем в верхнем меню вызывают команду «Данные» → «Анализ данных» → «Регрессия», в поле «Входной интервал Y» вводят диапазон ячеек AA8:AA15, в поле «Входной интервал X» – диапазон ячеек T8:Z15, выбирают уровень надежности 95 % и нажимают кнопку «Ок» (рис. 3).

	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA
6		Общий вид математической модели:							
7		$X_1$	$X_2$	$X_1 \cdot X_2$	$X_1^2$	$X_2^2$	$X_1^3$	$X_2^3$	Y
8		0,2	4,2	0,84	0,04	17,64	0,008	74,09	154
9		0,5	3	1,5	0,25	9	0,125	27	169
10		0,8	3,5	2,8	0,64	12,25	0,512	42,88	172,3
11		1	4	4	1	16	1	64	161,8
12		1,5	5,5	8,25	2,25	30,25	3,375	166,4	180,7
13		1,7	5	8,5	2,89	25	4,913	125	184,5
14		1,3	6,3	8,19	1,69	39,69	2,197	250	175
15		2	4	8	4	16	8	64	191,2
16									
17		=C15	=D15	=T15*U15	=T15^2	=U15^2	=T15^3	=U15^3	=J15
18									

Рис. 2. Общий вид математической модели

Регрессия

Входные данные

Входной интервал Y: \$AA\$8:\$AA\$15

Входной интервал X: \$T\$8:\$Z\$15

Метки  Константа - ноль

Уровень надежности: 95 %

Параметры вывода

Выходной интервал:

Новый рабочий лист:

Новая рабочая книга

Остатки

Остатки  График остатков

Стандартизованные остатки  График подбора

Нормальная вероятность

График нормальной вероятности

ОК Отмена Справка

Рис. 3. Меню параметров регрессии

	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	
6		Общий вид математической модели:														
7		$X_1$	$X_2$	$X_1 * X_2$	$X_1^2$	$X_2^2$	$X_1^3$	$X_2^3$	Y		Yp	Попадание в диапазон			Коэффициенты	
8		0,2	4,2	0,84	0,04	17,64	0,008	74,09	154		154	Да		Y-пересечение	-699,366993	
9		0,5	3	1,5	0,25	9	0,125	27	169		169	Да		Переменная X 1	638,4825457	
10		0,8	3,5	2,8	0,64	12,25	0,512	42,88	172,3		172,3	Да		Переменная X 2	385,4942923	
11		1	4	4	1	16	1	64	161,8		161,8	Да		Переменная X 3	115,1826746	
12		1,5	5,5	8,25	2,25	30,25	3,375	166,4	180,7		180,7	Да		Переменная X 4	-1347,375321	
13		1,7	5	8,5	2,89	25	4,913	125	184,5		184,5	Да		Переменная X 5	-59,85902299	
14		1,3	6,3	8,19	1,69	39,69	2,197	250	175		175	Да		Переменная X 6	424,6232455	
15		2	4	8	4	16	8	64	191,2		191,2	Да		Переменная X 7	1,569109734	
16																
17																
18																

=ЕСЛИ(И(AC15>=Q15;AC15<=R15);"Да";"Нет")

=\$AG\$8+\$AG\$9\*T15+\$AG\$10\*U15+\$AG\$11\*V15+\$AG\$12\*W15+\$AG\$13\*X15+\$AG\$14\*Y15+\$AG\$15\*Z15

**Рис. 5.** Рассчитанные при помощи математической модели значения и результат их попадания в доверительные интервалы

	A	B	C	D
15				
16		Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика
17	Y-пересечение	-699,366993	0	65535
18	Переменная X 1	638,4825457	0	65535
19	Переменная X 2	385,4942923	0	65535
20	Переменная X 3	115,1826746	0	65535
21	Переменная X 4	-1347,375321	0	65535
22	Переменная X 5	-59,85902299	0	65535
23	Переменная X 6	424,6232455	0	65535
24	Переменная X 7	1,569109734	0	65535

**Рис. 4.** Коэффициенты математической модели

В текущей рабочей книге появится новый лист с рассчитанными коэффициентами (рис. 4).

Полученные коэффициенты копируют на лист с основной таблицей, добавляют в таблицу столбец  $Y_p$  (рассчитанные значения математической модели) и вводят формулу математической модели (при этом коэффициенты необходимо вводить со знаками долларов, которые появляются при нажатии кнопки F4). Для проверки попадания рассчитанных значений в доверительные диапазоны еще в один столбец вводят соответствующую формулу. Далее введенные формулы копируют для всех 8 точек (рис. 5).

Как видно из полученных результатов, рассчитанные при помощи математической модели значения полностью совпадают с результатами экспериментов. Это свидетельствует об адекватности получен-

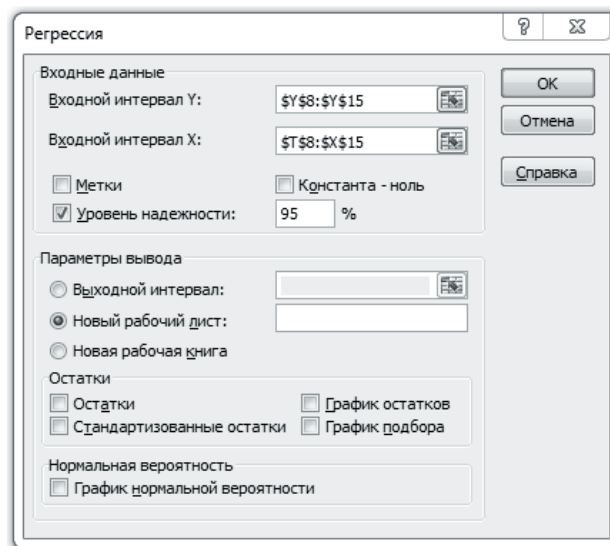
	S	T	U	V	W	X	Y
6		Общий вид математической модели:					
7		$X_1$	$X_2$	$X_1 * X_2$	$X_1^2$	$X_2^2$	Y
8		0,2	4,2	0,84	0,04	17,64	154
9		0,5	3	1,5	0,25	9	169
10		0,8	3,5	2,8	0,64	12,25	172,3
11		1	4	4	1	16	161,8
12		1,5	5,5	8,25	2,25	30,25	180,7
13		1,7	5	8,5	2,89	25	184,5
14		1,3	6,3	8,19	1,69	39,69	175
15		2	4	8	4	16	191,2

**Рис. 6.** Общий вид упрощенной математической модели

ной математической модели. Но учитывая то, что для каждой экспериментальной точки существует свой доверительный интервал, полученную модель можно упростить, убрав некоторые сложные функции.

При упрощении математической модели необходимо избавиться от тех функций, которые имеют наименьшую по модулю  $t$ -статистику (наименьшее влияние). В данном случае у всех коэффициентов  $t$ -статистика одинакова и равна 65535 (рис. 4). Поэтому нужно попробовать избавиться от наиболее сложных функций  $X_1^3$  и  $X_2^3$ , для чего удалить из таблицы соответствующие столбцы (рис. 6), еще раз выполнить регрессию (рис. 7) и найти коэффициенты новой математической модели (рис. 8).

Полученные коэффициенты модели копируют на



**Рис. 7.** Меню параметров упрощенной математической модели

	A	B	C	D
15				
16		Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика
17	Y-пересечение	244,5693812	46,84857689	5,220422849
18	Переменная X 1	-33,40001562	40,81255532	-0,818375996
19	Переменная X 2	-29,80917427	19,29060686	-1,54526887
20	Переменная X 3	9,190145818	8,120641175	1,131701995
21	Переменная X 4	7,287711052	7,015655835	1,038778301
22	Переменная X 5	1,874961798	2,337026351	0,802285262

**Рис. 8.** Коэффициенты упрощенной математической модели

	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	
6		Общий вид математической модели:												
7		X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> *X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	Y	Yp	Попадание в диапазон				Коэффициенты	
8		0,2	4,2	0,84	0,04	17,64	154	153,8	Да		Y-пересечение	244,5693812		
9		0,5	3	1,5	0,25	9	169	170,9	Да		Переменная X 1	-33,40001562		
10		0,8	3,5	2,8	0,64	12,25	172,3	166,9	Да		Переменная X 2	-29,80917427		
11		1	4	4	1	16	161,8	166	Да		Переменная X 3	9,190145818		
12		1,5	5,5	8,25	2,25	30,25	180,7	179,5	Да		Переменная X 4	7,287711052		
13		1,7	5	8,5	2,89	25	184,5	184,8	Да		Переменная X 5	1,874961798		
14		1,3	6,3	8,19	1,69	39,69	175	175,4	Да					
15		2	4	8	4	16	191,2	191,2	Да					
16														
17													= \$AG\$8+\$AG\$9*T15+\$AG\$10*U15+\$AG\$11*V15+\$AG\$12*W15+\$AG\$13*X15	

Рис. 9. Рассчитанные значения упрощенной математической модели

	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD
6		Общий вид математической модели:										
7		X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> *X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	Y		Yp	Попадание в диапазон			Коэффициенты
8		0,2	4,2	0,84	0,04	154		154,6	Да		Y-пересечение	219,618509
9		0,5	3	1,5	0,25	169		169,7	Да		Переменная X 1	-44,79317874
10		0,8	3,5	2,8	0,64	172,3		166,7	Да		Переменная X 2	-15,8694498
11		1	4	4	1	161,8		166,9	Да		Переменная X 3	12,35375525
12		1,5	5,5	8,25	2,25	180,7		180,8	Да		Переменная X 4	6,118859724
13		1,7	5	8,5	2,89	184,5		186,8	Да			
14		1,3	6,3	8,19	1,69	175		172,9	Да			
15		2	4	8	4	191,2		189,9	Да			
16												
17												= \$AG\$8+\$AG\$9*T15+\$AG\$10*U15+\$AG\$11*V15+\$AG\$12*W15

Рис. 10. Рассчитанные значения конечной математической модели

рабочий лист с основной таблицей и меняют формулу математической модели (рис. 9).

Все результаты в полученной математической модели попадают в доверительные интервалы. Поэтому можно еще дополнительно упростить математическую модель, избавившись от функции, которая имеет наименьшую по модулю *t*-статистику. Такой функцией является X<sub>2</sub><sup>3</sup>, с *t*-статистикой 0,82 (рис. 8). Выполнив вышеуказанные операции, получают конечную математическую модель (рис. 10).

Последующее упрощение математической модели путем удаления функции X<sub>2</sub><sup>3</sup> (наименьшая *t*-статистика, равная 0,94) приводит к выпадению одного из рассчитанных значений за границы диапазона, поэтому такое упрощение невозможно из-за потери адекватности, следовательно, конечную математическую модель можно описать уравнением (1)

$$y = 219,62 - 44,79x_1 - 15,87x_2 + 12,35x_1x_2 + 6,12x_1^2, \quad (1)$$

где *y* – временное сопротивление разрыву, МПа; *x*<sub>1</sub> и *x*<sub>2</sub> – содержание (%) в сплаве меди и кремния.

Для проверки адекватности полученной математической модели вызывают меню «Данные» → «Анализ данных» → «Двухвыборочный *F*-тест для

дисперсии». В поле «Интервал переменной 1» вводят диапазон ячеек Z8:Z15, в поле «Интервал переменной 2» – диапазон ячеек X8:X15, выбирают α = 0,05 и нажимают кнопку «Ok». Появится новый лист (рис. 11), на котором находят значение *F*-критерия (*F* ≈ 0,93) и *F*-критическое (*F*<sub>кр</sub> ≈ 0,26).

В случае *F* < *F*<sub>кр</sub> дисперсии считаются одинаковыми, а при *F* ≥ *F*<sub>кр</sub> – разными.

Далее вызывают меню «Данные» → «Анализ данных» → «Двухвыборочный *t*-тест с разными дисперсиями» (при *F* < *F*<sub>кр</sub> – с одинаковыми). В поле

	A	B	C
1	Двухвыборочный F-тест для дисперсии		
2			
3		Переменная 1	Переменная 2
4	Среднее	173,5458333	173,5458333
5	Дисперсия	137,0115422	146,8584722
6	Наблюдения	8	8
7	df	7	7
8	F	0,932949527	
9	P(F<=f) одностороннее	0,464702335	
10	F критическое одностороннее	0,264058226	

Рис. 11. Расчет *F*-критерия

	A	B	C
1	Двухвыборочный t-тест с различными дисперсиями		
2			
3		Переменная 1	Переменная 2
4	Среднее	173,5458333	173,5458333
5	Дисперсия	137,0115422	146,8584722
6	Наблюдения	8	8
7	Гипотетическая разность средних	0	
8	df	14	
9	t-статистика	-4,77129E-15	
10	P(T<=t) одностороннее	0,5	
11	t критическое одностороннее	1,761310136	
12	P(T<=t) двухстороннее	1	
13	t критическое двухстороннее	2,144786688	

Рис. 12. Расчет t-статистики

«Интервал переменной 1» вводят диапазон ячеек Z8:Z15, в поле «Интервал переменной 2» – X8:X15 и нажимают «Ok». Появляется новый лист (рис. 12), на котором находят значение t-статистики ( $t \approx 0$ ) и t-критическое ( $t_{кр} \approx 1,76$ ).

При условии, что  $|t| < t_{кр}$  полученная математическая модель считается адекватной, а при  $|t| \geq t_{кр}$  – неадекватной, и тогда выбирают более сложную зависимость (с добавлением большего количества функций) или проводят большее количество исследований. В данном случае модель является адекватной и поэтому можно переходить к этапу ее оптимизации.

Для определения оптимальных значений легирующих элементов необходимо провести оптимизацию данного процесса, для чего на текущем листе создают дополнительную таблицу, копируют в нее формулы расчета функций и математической модели, а также вводят и копируют формулы расчета минимальных и максимальных значений факторов для ограничения диапазона поиска. В ячейки T17 и U17 вводят значения  $x_1$  и  $x_2$ , при которых достигается наибольшее значение временного сопротивления разрыву (рис. 13).

Далее вызывают меню «Данные» → «Поиск решения». В поле «Оптимизировать целевую функцию» вводят координаты ячейки Z17, выбирают опцию «Максимум», а в поле «Изменяя ячейки перемен-

	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA
6	Общий вид математической модели:								
7		$x_1$	$x_2$	$x_1 * x_2$	$x_1^2$	$y$		$y_p$	Попадание в диапазон
8		0,2	4,2	0,84	0,04	154		154,6	Да
9		0,5	3	1,5	0,25	169		169,7	Да
10		0,8	3,5	2,8	0,64	172,3		166,7	Да
11		1	4	4	1	161,8		166,9	Да
12		1,5	5,5	8,25	2,25	180,7		180,8	Да
13		1,7	5	8,5	2,89	184,5		186,8	Да
14		1,3	6,3	8,19	1,69	175		172,9	Да
15		2	4	8	4	191,2		189,9	Да
16	Оптимизация:								
17		2	4	$\sqrt{8}$	$\sqrt{4}$			$\sqrt{189,9}$	
18		0,2	3	←=МИН(U8:U15)					
19		2	6,3	←=МАКС(U8:U15)					

Рис. 13. Подготовка математической модели к оптимизации

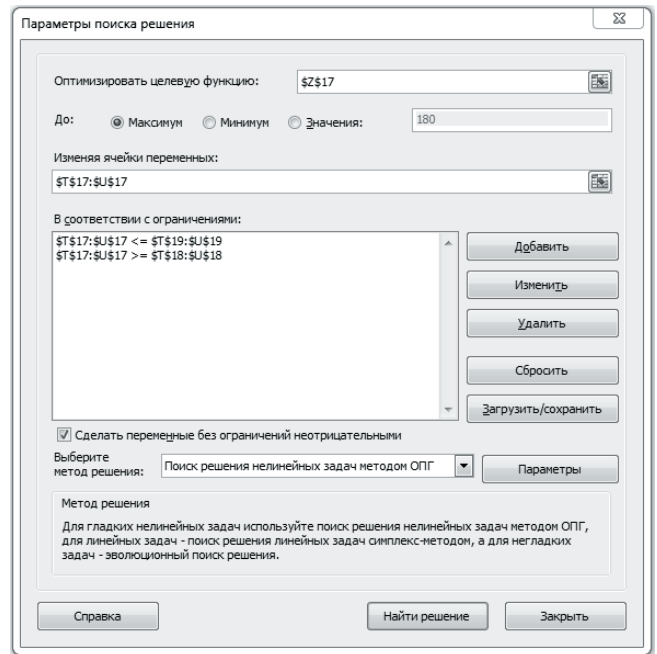


Рис. 14. Установка параметров оптимизации

ных» – координаты ячеек T17:U17. Затем добавляют два ограничения поиска и нажимают кнопку «Найти решение» (рис. 14).

В таблице появляются оптимальные значения содержания легирующих элементов ( $x_1 = 2\%$ ,  $x_2 = 6,3\%$ ), при которых временное сопротивление разрыву достигнет максимального значения – 210,2 МПа (рис. 15).

Используя полученную математическую модель можно также проводить прогнозирование временного сопротивления разрыву для любого количества легирующих элементов в заданных пределах. Для этого достаточно записать в ячейки T17 и U17 необходимые значения  $x_1$  и  $x_2$ , и в ячейке Z17 автоматически появится рассчитанное значение временного сопротивления разрыву.

Перед построением двумерного графика при помощи математической модели рассчитывают массив промежуточных данных, для чего создают таблицу расчета промежуточных значений и в ячейку AG10 вводят формулу математической модели, приняв для фактора  $x_1$  ячейку AG8, а для  $x_2$  – AG9 (рис. 16).

Далее выделяют диапазон ячеек AG10:AQ27 и выбирают команду «Данные» → «Работа с данными» → «Анализ «Что если» → «Таблица данных». В поле «Подставлять значения по столбцам в:» вводят ячейку AG8, а в поле «Подставлять значения по строкам в:» – ячейку AG9 и нажимают кнопку «Ok».

	S	T	U	V	W	X	Y	Z
16	Оптимизация:							
17		2	6,3	12,6	4			210,2
18		0,2	3					
19		2	6,3					

Рис. 15. Результат оптимизации

	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ
8		X1:											
9		X2:											
10		Y:	220	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2
11			3										
12			3,2										
13			3,4										
14			3,6										
15			3,8										
16			4										
17			4,2										
18			4,4										
19			4,6										
20			4,8										
21			5										
22			5,2										
23			5,4										
24			5,6										
25			5,8										
26			6										
27			6,2										

Рис. 16. Вспомогательная таблица для построения графика

	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ
8		X1:											
9		X2:											
10		Y:	220	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2
11			3	171	170	170	170	170	172	173	175	178	181
12			3,2	168	168	168	169	170	171	173	176	179	183
13			3,4	165	166	166	167	169	171	174	177	180	185
14			3,6	163	163	164	166	168	171	174	178	182	186
15			3,8	160	161	163	165	168	171	174	178	183	188
16			4	157	159	161	164	167	170	175	179	184	190
17			4,2	155	157	159	163	166	170	175	180	186	192
18			4,4	152	155	158	161	165	170	175	181	187	193
19			4,6	149	152	156	160	165	170	175	182	188	195
20			4,8	147	150	154	159	164	170	176	182	189	197
21			5	144	148	153	158	163	169	176	183	191	199
22			5,2	141	146	151	157	163	169	176	184	192	200
23			5,4	139	144	149	155	162	169	177	185	193	202
24			5,6	136	141	148	154	161	169	177	185	194	204
25			5,8	133	139	146	153	161	169	177	186	196	206
26			6	131	137	144	152	160	168	177	187	197	208
27			6,2	128	135	143	151	159	168	178	188	198	209

Рис. 17. Таблица с рассчитанными значениями

В результате получают таблицу с рассчитанными значениями (рис. 17).

Для построения двумерного графика выделяют диапазон ячеек AH11:AQ27 и вызывают команду «Вставка» → «Диаграммы» → «Другие» → «Поверхность» (рис. 18).

Полученный график форматируют, для чего правой кнопкой мыши нажимают по графику и выбирают команду «Выбрать данные» (рис. 19).

В полученном меню для каждого ряда меняют «Подписи горизонтальной оси (категории)», нажав

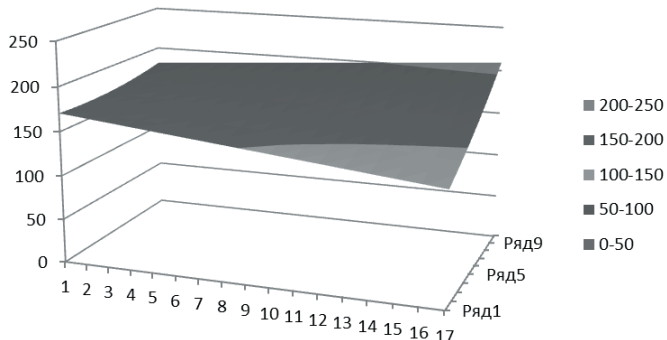


Рис. 18. Двухмерный график

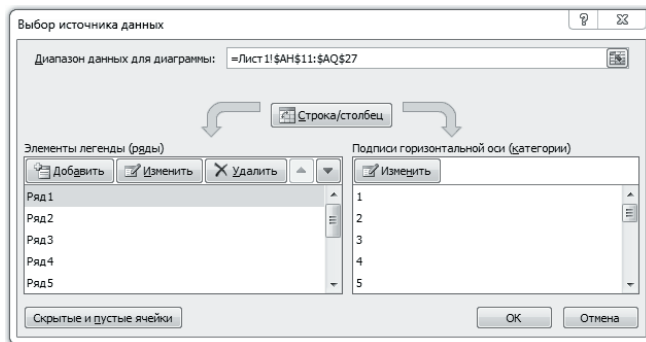


Рис. 19. Меню выбора источника данных

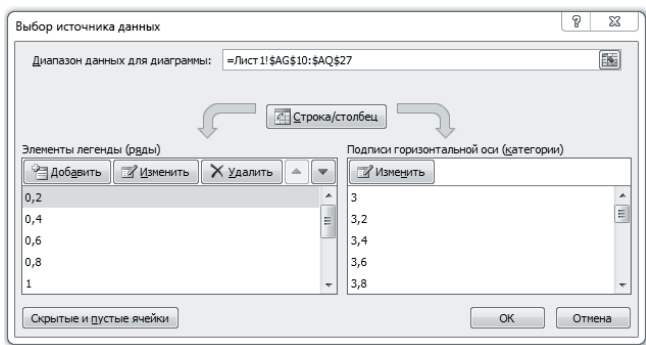


Рис. 20. Меню выбора источника данных с введенными значениями

на кнопку «Изменить» и введя диапазон ячеек AG11:AQ27, а также их названия в соответствии со значениями ячеек AH10:AQ10. Для изменения названий по очереди выделяют ряды и на ярлыке «Элементы легенды (ряды)», нажимают на кнопку «Изменить», а в поле «Имя ряда» – на соответствующее значение из диапазона ячеек AH10:AQ10 (рис. 20).

Кликнув по кнопке «Ok», на график добавляют сетку, нажимая по каждой из осей и выбирая команду «Добавить основные линии сетки». Так как рассчитанные значения временного сопротивления находятся в диапазоне от 128 до 209 МПа, границы отображения данного параметра расширяют от 100 до 220 МПа, для чего левой кнопкой мыши дважды нажимают по вертикальной оси и на ярлыке «Параметры оси» выставляют соответствующие «Минимальное» и «Максимальное» значения параметров.

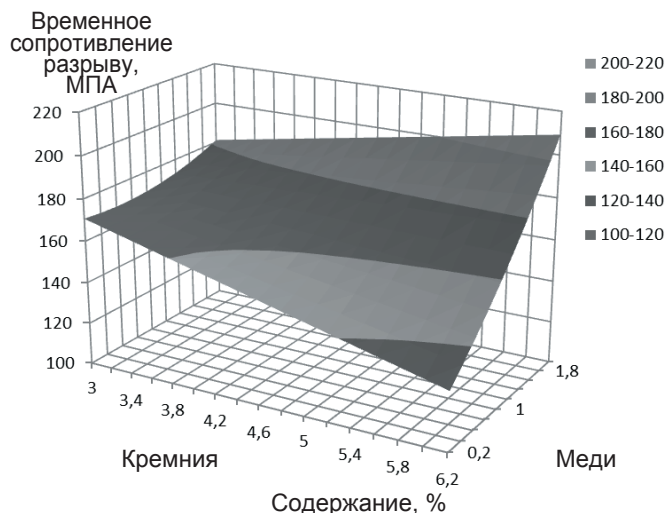
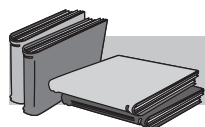


Рис. 21. Конечный вид графика

С целью добавления подписей под осями диаграмму активируют и в верхней строке выбирают команду «Работа с диаграммами» → «Макет» → «Название осей» → «Название основной горизонтальной оси», после чего данную процедуру повторяют с другими осями. В случае необходимости можно изменить параметры отображения графика (рис. 21).

## Выводы

На примере процесса легирования алюминия медью и кремнием рассмотрены этапы расчета двухфакторной математической модели в программе MS Excel 2010. Приведенную методику можно использовать для обработки результатов любых двухфакторных экспериментов.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Чернега Д. Ф., Рыбак В. Н. Обработка результатов однофакторного эксперимента металлургического процесса при помощи функции «Линия тренда» программы Microsoft Excel 2010. – Металл и литье Украины. – 2013. – № 7. – С. 31-37.

### Анотація

Чернега Д. Ф., Рыбак В. М.

Обробка результатів двофакторного експерименту металургійного процесу за допомогою програми Microsoft Excel 2010

Запропоновано методику обробки результатів двофакторних експериментів за допомогою програми Microsoft Excel 2010. На прикладі легування алюмінію міддю та кремнієм розглянуто етапи розрахунку двофакторної математичної моделі в програмі MS Excel 2010. При цьому, використовуючи всього одну програму, за порівняно короткий час вдалося виконати цілий комплекс розрахунків двофакторного експерименту, а саме: визначити середні значення відгуків кожної точки та їх довірчі інтервали; обрати вид математичної моделі та розрахувати її коефіцієнти; спростити математичну модель, розрахувавши значимість кожної із функцій, що входять до її складу; перевірити математичну модель на адекватність; провести оптимізацію математичної моделі та прогнозування за її допомогою; побудувати двомірну графічну залежність процесу. Наведену методику обробки результатів двофакторного експерименту можуть використовувати вітчизняні науковці та фахівці для обробки результатів будь-яких двофакторних експериментів металургійних і неметалургійних процесів.

### Ключові слова

двофакторний експеримент, Microsoft Excel 2010, математична модель, довірчий інтервал, адекватність, оптимізація, прогнозування, графік

### Summary

Chernega D. F., Rybak V. N.

Processing of results of two-factorial experiment of metallurgical process by means of the MS Excel 2010 program

The technique of processing of results of two-factorial experiments by means of the Microsoft Excel 2010 program is offered. On an example of an alloying of aluminum copper and silicon considered stages of calculation of two-factorial mathematical model in the MS Excel 2010 program. Thus, using only one program, for rather short time it was possible to execute the whole complex of calculations of two-factorial experiment, namely: to define average values of responses of each point and their confidential intervals; to choose a type of mathematical model and to calculate its factors; to simplify mathematical model, having calculated the importance of each of functions which are included into its structure; to check mathematical model on adequacy; to optimize mathematical model; to carry out forecasting by means of mathematical model; to construct two-dimensional graphic dependence of process. The given technique of processing of results of two-factorial experiment can be used by domestic researchers and experts for processing of results of any two-factorial experiments of metallurgical and not metallurgical processes.

### Keywords

two-factorial experiment, Microsoft Excel 2010, mathematical model, confidential interval, adequacy, optimization, prediction, graph

Поступила 19.07.13