

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО ОПТИМИЗАЦИИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ОПЫТНЫХ МАРОК ВАЛКОВЫХ СТАЛЕЙ НА ОСНОВЕ ДРОБНО-ФАКТОРНОГО АНАЛИЗА

С.С. Кочковская, А.И. Сердюк (ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет»)

Приводятся результаты разработки программного продукта в объектно-ориентированной среде Delphi на основе дробно-факторного эксперимента, позволяющего автоматизировать процесс обработки экспериментальных данных. На основе полученных графических и математических зависимостей установлен вклад влияния отдельных легирующих элементов на механические свойства валковых марок сталей. Созданная программа успешно внедрена в ЦЗП АО «Уральская сталь», (г. Новотроицк).

Ключевые слова: химический состав, механические свойства, оптимизация, эксперимент, моделирование.

В настоящее время на предприятиях тяжелого машиностроения Оренбургской области, таких как АО «МК ОРМЕТО-ЮУМЗ» (г. Орск) и АО «Уральская сталь» (г. Новотроицк) отмечается существенная проблема, касающаяся улучшения качества прокатного инструмента (по механическим свойствам) из сталей 75ХМ, 45Х5МФ, 50, 75ХМФ, 75Х3МФ, 75Х3МФА, 75ХМФА, 90ХФ, 9Х2МФ, 50ХН, 60ХН.

Вкладом в решение данной проблемы является совершенствование химического состава имеющегося в производстве материала и изучения его влияния на механические свойства. Для этого осуществляют опытные технологические плавки по поиску оптимального состава и количества легирующих элементов, требующие большого объема времени и значительных средств. В результате уже накоплены большие объемы экспериментальных данных, но во многих случаях отсутствуют закономерности влияния количества и рассеивания множества легирующих элементов и их комбинаций на механические характеристики материала [1–2].

В связи с этим возникла задача автоматизации процесса считывания экспериментальных данных из различных форматов, их статистической обработки, вывода результатов в текстовой и графической форме. В этих условиях разработка теоретических и практических решений для автоматизации процесса обработки экспериментальных данных является актуальной научной задачей [3].

Для компьютерного моделирования процесса считывания экспериментальных данных, их статистической обработки, а также хранения математических моделей влияния количества и рассеивания легирующих элементов на механические свойства валковых сталей создан программный комплекс Sostav.

Наиболее эффективным методом математической теории по поиску оптимальных режимов протекания технологических процессов и выбору оптимального состава многокомпонентных смесей и сплавов является методика планирования экстремальных экспериментов, ориентированных на поиск различных технических оптимумов, разработанная учеными Р.А. Фишера, Д. Бокса, Д. Кифера. Данная методика достаточно хорошо формализована, но в связи с ее трудоемкостью имеются проблемы с использованием данного подхода в практических исследованиях [4].

Программный комплекс включает 11 БД, содержащих экспериментальные данные по процентному содержанию элементов химического состава и механическим свойствам опытных плавок валковых марок сталей. Для разработки программного комплекса использовалась среда Delphi, загружаемые данные созданы в среде СУБД MS Access. Работа в этом комплексе включает шесть этапов [5].

Этап 1. Ввод необходимых данных.

Для определения вклада легирующих элементов необходимы сведения о марке стали, критерии Стьюдента (t) и уровня значимости (α), которые выбираются из ниспадающего списка перед считыванием значений с БД.

Этап 2. Расчет коэффициентов уравнений регрессии. Для обработки результатов проведенных экспериментов и дальнейшего определения коэффициентов уравнения регрессии факторы приводят к одному масштабу. Это достигается путем кодирования переменных. Для нахождения параметров уравнений регрессии был использован метод наименьших квадратов. Расчет коэффициентов уравнений регрессии производится с последующим выводом на экранную форму.

Этап 3. Расчет числа значимых коэффициентов уравнений регрессии. Полученные коэффициенты необходимо проверить на значимость. Проверка осуществляется с помощью критерия Стьюдента. Расчет числа значимых коэффициентов уравнений регрессии производится выводом на экранную форму.

Этап 4. Выбор критического значения критерия Фишера. Табличное значение критерия находят из таблиц критических точек распределения Фишера по заданному уровню значимости α и по соответствующим степеням свободы $k_1 = n - r$ и $k_2 = n(m - 1)$. Выбор табличного значения критерия Фишера предусмотрен из ниспадающего списка при запуске экранной формы.

Этап 5. Расчет уравнений регрессии. Полученное уравнение регрессии необходимо проверить на адекватность. Проверка осуществляется с помощью критерия Фишера, если $F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$, то уравнение адекватно, в противном случае — неадекватно. Если уравнение адекватно производится его вывод на экранную форму.

Этап 6. Построение круговой диаграммы. Результаты расчетов отображаются в виде круговой диаграммы.

Таблица. Матрица планирования дробно-факторного эксперимента типа ПФЭ⁶⁻²

Факторы	Содержание, %						Парные взаимодействия				Предел прочности, R _c , Н/мм ²	Предел текучести, R _m , Н/мм ²	Ударная вязкость, KCU, кДж/м ²
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	x ₁ x ₂	x ₁ x ₄	x ₂ x ₃	x ₂ x ₄			
код	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅ =x ₁ x ₃	x ₆ =x ₂ x ₄	x ₁ x ₂	x ₁ x ₄	x ₂ x ₃	x ₂ x ₄	y ₁	y ₂	y ₃
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	828	718	190
2	+	-	-	-	+	-	-	-	+	+	920	578	260
...
15	-	+	+	+	-	+	-	-	+	+	905	568	183
16	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	633	667	213

В качестве примера рассмотрим исследование влияния химического состава на предел прочности, предел текучести и ударную вязкость валковой марки стали 45X5MФ. Для оптимизации отдельных режимов технологических операций, а также для целей контроля стабильности процессов и их совместного воздействия на уровень характеристик механических свойств материала был применен дробнофакторный дисперсионный анализ по плану ПФЭ⁶⁻², причем каждый эксперимент повторялся по три раза (таблица).

В качестве факторов, влияющих на прочность y₁ (Н/мм²), предел текучести y₂ (Н/мм²), ударную вязкость y₃ (кДж/м²) были выбраны следующие: z₁—углерод,%; z₁⁺ = 0,05; z₁⁻ = 0,34; z₂—марганец,%; z₂⁺ = 0,49; z₂⁻ = 0,27; z₃—кремний,%; z₃⁺ = 0,43; z₃⁻ = 0,21; z₄—хром,%, z₄⁺ = 5,06; z₄⁻ = 4,6; z₅—никель,%, z₅⁺ = 0,38; z₅⁻ = 0,3; z₆—молибден,%, z₆⁺ = 0,3; z₆⁻ = 0,2.

Работа проводилась по следующим этапам:

- кодирование переменных;
- построение матрицы планирования в кодированных переменных с учетом парных взаимодействий и дополняем столбцом средних значений отклика;
- вычисление коэффициентов уравнения регрессии;
- проверка вычисленных коэффициентов на значимость с предварительным определением дисперсии воспроизводимости;

- проверка полученного уравнения на адекватность;
- оценка точности соответствия физических параметров стали заданному качеству сплава;
- проведение интерпретации полученной модели [6].

Оценка точности соответствия физических параметров стали заданному качеству сплава проводилась методом множественной корреляции. При получении уравнения множественной регрессии был определен коэффициент множественной корреляции, равный 0,7468, который указывает на весьма тесную связь всего набора факторов [7].

Долю дисперсии результата за счет представленных в уравнении факторов в общей вариации результата оценивают с помощью нескорректированного коэффициента множественной детерминации. Здесь эта доля составляет 55,7% и указывает на высокую степень обусловленности вариации результата вариацией факторов, иными словами — на весьма тесную связь факторов с результатом.

Скорректированный коэффициент множественной детерминации определяет тесноту связи с учетом степеней свободы общей и остаточной дисперсий. Он дает такую оценку тесноты связи, которая не зависит от числа факторов и поэтому может сравниваться по разным моделям с разным числом факторов. Коэффициенты указывают на высокую (> 51,5%) детерминированность результата в модели.

Оценку надежности уравнения регрессии в целом и показателя тесноты связи дает F-критерий Фишера. Получили, что F_{факт} = 3,5 > F_{табл} = 2,09 (при n = 16), то есть вероятность случайно получить такое значение F-критерия не превышает допустимый уровень значимости 5%. Следовательно, полученное значение не случайно, оно сформировалось под влиянием существенных факторов, то есть подтверждается статистическая значимость всего уравнения и показателя тесноты связи.

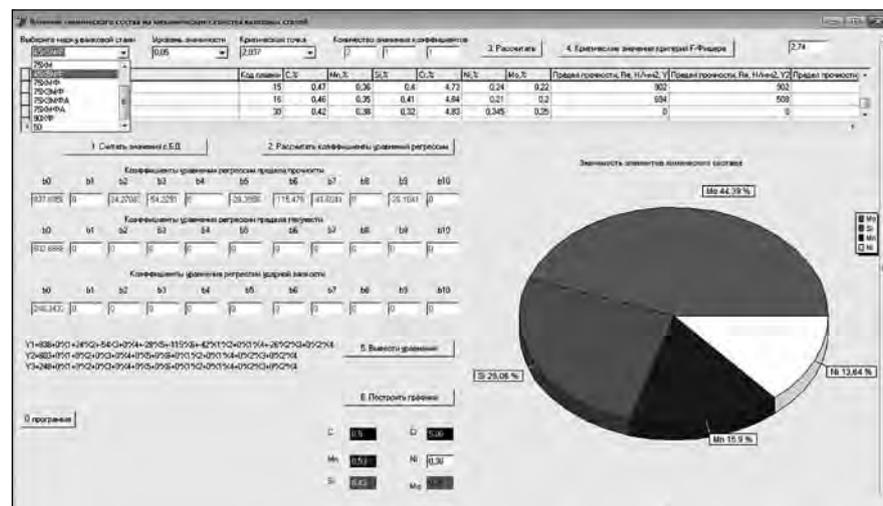


Рис. 1. Результат работы программы моделирования

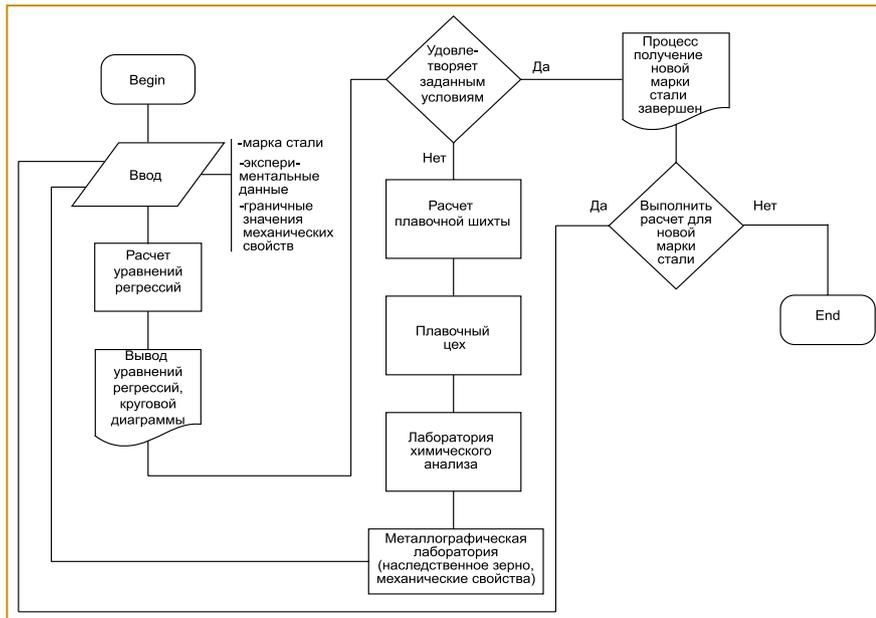


Рис. 2. Схема расчета плавочной шихты

С помощью частных F -критериев Фишера оценивается целесообразность включения в уравнение множественной регрессии факторов. Значения частного F -критерия Фишера определялись как квадрат соответствующего значения t -критерия Стьюдента: $F_{x_1} = 6,52$; $F_{x_2} = 0,943$; $F_{x_3} = 0,0237$; $F_{x_4} = 5,184$; $F_{x_5} = 5,354$; $F_{x_6} = 3,803$. После сравнения ($F_{xi} < F_{табл}$) получено, что включение в модель фактора x_2 , x_3 и x_5 статистически нецелесообразно.

Приводимые выше данные указывают на то, что результат влияния всех легирующих элементов на характеристики механических свойств находится в тесной связи.

Наличие информации о физико-химических параметрах взаимодействия позволяет всесторонне оценивать как роль общего состава стали, так и вклада отдельных легирующих элементов.

Результат работы программы моделирования представлен на рис. 1.

Программный комплекс Sostav позволяет решать следующие основные задачи: выбор оптимального химического состава валковых сталей; вклад отдельных легирующих элементов в механизм упрочнения валковых сталей и расчет многокомпонентной шихты путем определения процентного содержания легирующих элементов по отношению к общему составу на основе полученных графических и математических зависимостей экспериментальных данных [8].

Схема расчета плавочной шихты представлена на рис. 2.

Программный комплекс не требует специальных навыков при использовании, позволяет значительно сократить время, необходимое технологу и научному работнику на расчет многокомпонентной шихты, определение оптимального химического состава и вклада легирующих элементов.

Программное средство позволяет выводить уравнения регрессии для каждого механического свойства и строить круговую диаграмму, по которой можно определить влияние того или иного химического элемента на механические свойства. Также есть возможность ввести обработку данных непосредственно с окон ввода, варьируя тем самым экспериментальные данные. Это позволит на качественно новом уровне подойти к решению задачи выбора оптимальных химических

составов валковых сталей, обеспечивающих внутреннюю структуру, предопределяющую требуемый уровень комплекса свойств.

Список литературы

1. Протасов К.В. Статистический анализ экспериментальных данных: учебник. М: Мир. 2005. 142 с.
2. Рыков А.С. Системный анализ: модели и методы принятия решений и поисковой оптимизации: монография. М: МИСиС, 2009. 608 с.
3. Степнов М.Н., Шаврин А.В. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: справочник. М: Машиностроение. 2005. 400 с.
4. Belevantsev A.A., Veselevich E.A., Ivannikov V.P. Analysis of entities in c and C++ programs and relations between them for program understanding Programming and Computer Software. 2016. Т. 42. № 1. С. 49-53.
5. Gurman V.I., Rasina I.V., Fesko O.V., Guseva I.S. On certain approaches to optimization of control processes. II Automation and Remote Control. 2016. Т. 77. № 9. С. 1544-1556.
6. Krylova S.E., Kletsova O.A., Kochkovskaya S.S. Study of the structure and properties of hot-rolling rolls from steel 70KH3G2VTB after heat treatment // Metal Science and Heat Treatment. 2015. 57, 1. p. 87-90.
7. Райбман Н.С., Чадеев В.М. Построение моделей процессов производства. М.: Энергия, 1975. 376 с.
8. Кочковская С.С., Сердюк А.И. Компьютерное моделирование зависимостей механических свойств от химического состава валковой стали марки 75ХМФ // Материалы II междуна. научно-практич. конф. «Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн». М: ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2015. Вып 1 – в 2 т. С. 226-230.

*Кочковская Светлана Сергеевна – аспирант кафедры «Систем автоматизации производства»,
Сердюк Анатолий Иванович – д-р техн. наук, проф., директор Аэрокосмического института
ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет».*

Контактный телефон (987) 840-40-35.

E-mail: lana1905@mail.ru