

УДК 621.057

Е.Ю. Новикова, А.И. Михалев, Ю.А. Бубликов

НЕЧЕТКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА МИКРОЛЕГИРОВАНИЯ СТАЛИ С КАРБОНИТРИДНЫМ УПРОЧНЕНИЕМ

В данной работе для определения влияния концентраций, как базовых элементов, так и микролегирующих добавок на величину зерна и механические свойства стали 20ГЛ с карбонитридным упрочнением и нахождения их оптимальных содержаний с целью снижения расхода легирующих материалов были использованы методы и алгоритмы нечеткой логики. Модели описывают явления и процессы реального мира на естественном языке с использованием лингвистических переменных.

У даній роботі для визначення впливу концентрацій, як базових елементів, так і мікролегируючих добавок на величину зерна й механічні властивості стали 20ГЛ із карбонітридним зміцненням і знаходження їхніх оптимальних змістів з метою зниження витрати легиуючих матеріалів були використані методи й алгоритми нечіткої логіки. Моделі описують явища й процеси реального миру природною мовою за допомогою лінгвістичних змінних.

In this work for determination of influencing concentrations as base elements of so micro-alloying additions on the size corn and mechanical properties 20GL became with the carbonitrides hardening and findings of their optimum maintenances with the purpose decline expense of alloying materials were to applying methods and algorithms of fuzzy logic. Models of fuzzy logic describe the phenomena and processes of the real world in human language through linguistic variables.

Ведение

Для получения литых изделий с высокими эксплуатационными характеристиками на сегодняшний день используют стали легированные дорогими элементами (например, никелем, хромом, ванадием, молибденом, медью), применение которых существенно увеличивает себестоимость отливок, и как правило, не компенсируются соответственным снижением металлоемкости. Одним из перспективных направлений повышения свойств литого металла является карбонитридное упрочнение, которое достаточно широко используется для деформируемых сталей типа Г2, микролегируемых азотом и ванадием (ниобием) [5].

Широкое распространение сталей этого класса в значительной мере ограничивается также отсутствием в Украине собственной сырьевой базы для производства сплавов этих элементов и их высокой стоимостью. В то же время данные свидетельствуют о том, что эта задача может быть успешно решена использованием относительно дешевых, а главное, доступных нитридообразующих элементов – титана и алюминия.

Для достижения этой цели выполнены исследования, направленные на определение оптимального состава литой стали 20ГЛ, модифицированной

азотом и относительно дешёвыми и доступными алюминием и титаном вместо дорогих и дефицитных ванадия, никеля и хрома.

Для определения влияния концентраций как базовых элементов так и микролегирующих добавок на величину зерна и механические свойства стали 20ГЛ с карбонитридным упрочнением и нахождения их оптимальных содержаний с целью снижения расхода легирующих материалов применяются методы и алгоритмы нечеткой логики [1,4].

Постановка задачи

Задача состоит в том, чтобы разработать эффективные экспертные системы, реализованные в виде систем нечеткого вывода. Это позволит определить предел текучести, ударную вязкость КСУ и балл зерна на основании результатов испытаний стали 20ГЛ с карбонитридным упрочнением:

- 21 плавка, индукционная печь;
- 45 плавок, цеховая технология,

т.е. субъективных оценок экспертов микролегирования электростали 20ГЛ азотом (АЛК), титаном (Тi) и алюминием (Аl) [6].

Методы и алгоритмы нечеткой логики

Нечеткие знания формулируются в виде нечетких продукционных правил вывода, задаваемых в форме «ЕСЛИ-ТО» (англ.: if-then rule):

$$\text{ЕСЛИ } x \text{ это } A, \text{ ТО } y \text{ это } B, \quad (1)$$

где A и B – это лингвистические термы и соответствующие им функции принадлежности $\mu_A(x)$, $\mu_B(x)$, построенные в пространстве входных значений X и выходных Y . Для m правил, база правил будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} R_1: & \text{ЕСЛИ } x_1 \text{ это } A_{11} \dots \text{И} \dots x_n \text{ это } A_{1n}, \\ & \text{ТО } y \text{ это } B_1 \\ R_i: & \text{ЕСЛИ } x_1 \text{ это } A_{i1} \dots \text{И} \dots x_n \text{ это } A_{in}, \\ & \text{ТО } y \text{ это } B_i \\ & \dots\dots\dots \\ R_m: & \text{ЕСЛИ } x_1 \text{ это } A_{m1} \dots \text{И} \dots x_n \text{ это } A_{mn}, \\ & \text{ТО } y \text{ это } B_m, \end{aligned} \quad (2)$$

где $x_j, j = \overline{1, n}$ - имена входных переменных; y - имя выходной переменной; $A_{ij}, i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}$ - заданные функции принадлежности.

Результатом нечеткого вывода является четкое значение переменной $\tilde{y} \in Y$ на основе заданных четких значений $\tilde{x}_j \in X, j = \overline{1, n}$.

Для обеспечения в данной работе базы правил с механизмами ввода-вывода создается система, которая включает в себя четыре этапа (рис. 1):

- Введение нечеткости (фаззификация). Фаззификатор, преобразует фиксированный вектор влияющих факторов X в вектор нечетких множеств \bar{X} , необходимых для выполнения нечеткого логического вывода.
- Машина нечеткого логического вывода, которая на основе правил базы знаний определяет значение выходной переменной в виде нечеткого множества \bar{Y} , соответствующего нечетким значениям входных переменных \bar{X} .
- Композиция и приведение к четкости, или дефаззификация. Дефаззификатор, преобразует выходное нечеткое множество \bar{Y} в конкретное число Y .

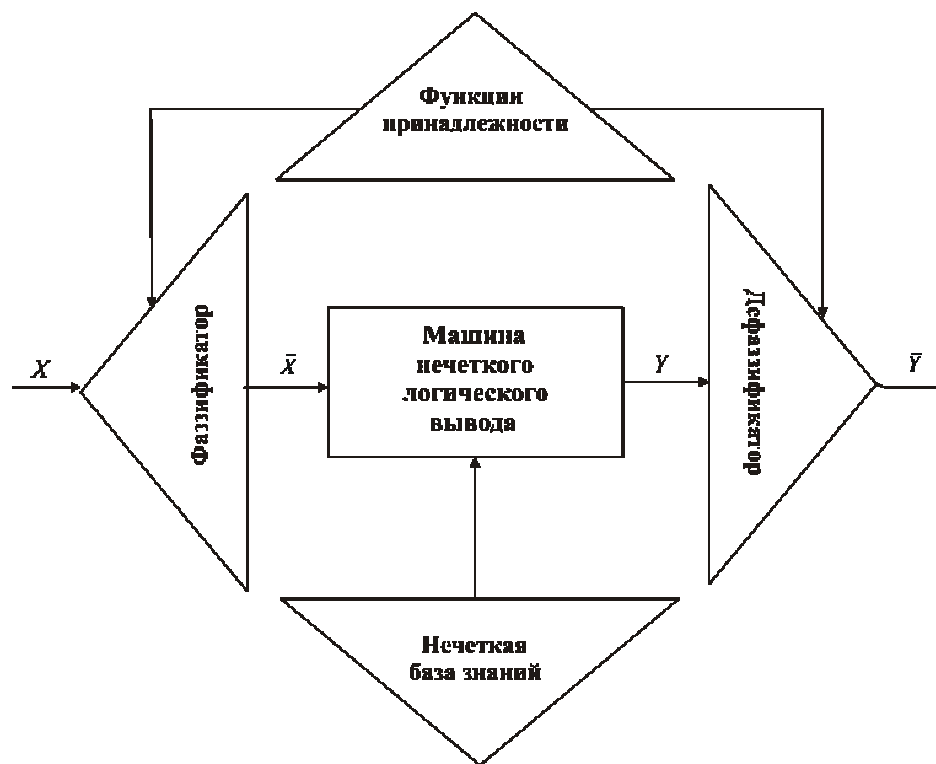


Рисунок 1 - Структура нечеткой системы

Для реализации системы ввода-вывода в машине нечеткого логического вывода использован алгоритм Е. Мамдани [2,3].

Данный алгоритм математически описывается следующим образом:

1. Процедура фаззификации: определяются степени истинности, т.е. значения функций принадлежности (ФП) для левых частей каждого правила (предпосылок). Для базы знаний с m правилами вида (2) обозначим степени истинности как

$$A_{ij}(\tilde{x}_j), i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}. \quad (3)$$

2. Нечеткий вывод. Сначала определяются уровни «отсечения» для левой части каждого из правил. В качестве t -нормы выступает логический минимум (min):

$$\alpha_i = \min_j(A_{ij}(\widetilde{x}_j)), i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}. \quad (4)$$

Далее находятся «усеченные» функции принадлежности

$$B'_i(y) = \min_i(\alpha_i, B_i(y)), i = \overline{1, m}. \quad (5)$$

3. Композиция, или объединение полученных усеченных функций, для чего используется максимальная композиция:

$$\mu(y) = \max(B'_i(y)), i = \overline{1, m}, \quad (6)$$

где $\mu(y)$ – функция принадлежности итогового нечеткого множества.

4. На этапе дефаззификации приведение к четкости можно осуществить разными методами.

Метод среднего центра, или центроидный метод:

$$\widetilde{y} = \frac{\int yB(y)}{\int B(y)}, \quad (7)$$

или для дискретного варианта:

$$\widetilde{y} = \frac{\sum_{i=1}^m \alpha_i y_i}{\sum_{i=1}^m \alpha_i}. \quad (8)$$

Метод среднего максимума:

$$\widetilde{y} = \frac{\sum_{k=1}^r y_k}{r},$$

где r – число точек переменной y , в которых $B(y)$ достигает максимального значения.

Нечеткое моделирование

В качестве входных параметров системы нечеткого вывода, для первого случая (21 плавка, индукционная печь) будем рассматривать 6 нечетких лингвистических переменных: «расход АЛК» (“Alk”), «уровень Ti» (“Ti”), «уровень Al» (“Al”), «уровень Si» (“Si”), «уровень Mn» (“Mn”), «уровень C» (“C”). При этом в качестве выходных (оптимизационных) параметров выступают нечеткие лингвистические переменные «предела текучести» (“Limit”), «балл зерна» (“Z”) и «ударная вязкость» (“KCU”).

Структурно - логическая модель влияния технологических факторов на свойства стали марки 20ГЛ представлена графом на рисунке 2.

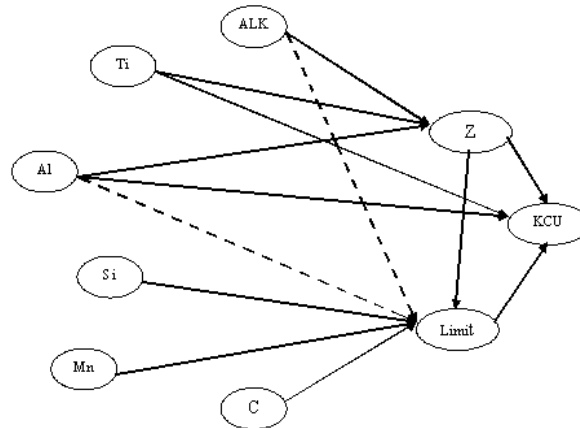


Рисунок 2 - Граф влияния технологических факторов на свойства стали 20 ГЛ (21 плавка, индукционная печь)

В качестве терм-множеств входных лингвистических переменных (ЛП) будем использовать множества: $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6$.

1-ая ЛП: «расход АЛК» (“Alk”) будем использовать множество $T_1 = \{\text{«наименьший» (“VerySmall”), «малый» (“Small”), «средний» (“Middle”), «высокий» (“High”), «наивысший» (“VeryHigh”)}\}$. Производится оценка по 7,5 бальной порядковой шкале, при которой цифре 0 соответствует наименьшая оценка, а цифре 7,5 – наивысшая оценка;

2-ая ЛП: «уровень Ti» (“Ti”) будем использовать множество $T_2 = \{\text{«наименьший» (“VerySmall”), «малый» (“Small”), «средний» (“Middle”), «высокий» (“High”), «наивысший» (“VeryHigh”)}\}$. Производится оценка по 0,11 бальной порядковой шкале, при которой цифре $\leq 0,008$ соответствует наименьшая оценка, а цифре 0,11 – наивысшая оценка;

3-ия ЛП: «уровень Al» (“Al”) будем использовать множество $T_3 = \{\text{«наименьший» (“VerySmall”), «малый» (“Small”), «средний» (“Middle”), «высокий» (“High”), «наивысший» (“VeryHigh”)}\}$. Производится оценка по 0,07 бальной порядковой шкале, при которой цифре $\leq 0,02$ соответствует наименьшая оценка, а цифре 0,07 – наивысшая оценка;

4-ая ЛП: «уровень Si» (“Si”), будем использовать множество $T_4 = \{\text{«наименьший» (“VerySmall”), «малый» (“Small”), «средний» (“Middle”), «высокий» (“High”), «наивысший» (“VeryHigh”)}\}$. Производится оценка по 0,55 бальной порядковой шкале, при которой цифре 0,30 соответствует наименьшая оценка, а цифре 0,55 – наивысшая оценка;

5-ая ЛП: «уровень Mn» (“Mn”), будем использовать множество $T_5 = \{\text{«наименьший» (“VerySmall”), «малый» (“Small”), «средний» (“Middle”), «высокий» (“High”), «наивысший» (“VeryHigh”)}\}$. Производится оценка по 1,52 бальной порядковой шкале, при которой цифре 1,18 соответствует наименьшая оценка, а цифре 1,52 – наивысшая оценка;

6-ая ЛП: «уровень С» (“С”), будем использовать множество $T_6 = \{\text{«наименьший» (“VerySmall”), «малый» (“Small”), «высокий» (“High”), «наивысший» (“VeryHigh”)}\}$. Производится оценка по 0,24 бальной порядковой шкале, при которой цифре 0,17 соответствует наименьшая оценка, а цифре 0,24 – наивысшая оценка.

В качестве терм-множеств выходных ЛП будем использовать множества P_1, P_2, P_3 .

1-ая ЛП: «балл зерна» (“Ball”) будем использовать множество $P_1 = \{\text{«min» (“Min”), «средний» (“Middle”), «max» (“Max”)}\}$. Производится оценка по 9,5 бальной порядковой шкале, при которой цифре $\leq 8,75$ соответствует наименьшая оценка, а цифре 9,5 – наибольшая оценка, смотри таблицу соответствий 1.1;

2-ая ЛП: «предела текучести» (“Limit”) будем использовать множество $P_2 = \{\text{«min» (“Min”), «ниже среднего» (“BelowMiddle”), «средний» (“Middle”), «max» (“Max”)}\}$. Производится оценка по 465 бальной порядковой шкале, при которой цифре ≤ 390 соответствует наименьшая оценка, а цифре 465 – наибольшая оценка;

Таблица 1

Таблица соответствий фактического балла зерна и оценочной шкалы нечеткого терм-множества «балл зерна»

Фактический балл зерна	Оценочная шкала нечеткого терм-множества «балл зерна»
8,9	8.5
9,8	8.75
9	9.0
9,10,8 (8,9,10)	9.25
9,10	9.5
10,9	9.75
10	10

3-ая ЛП: 2-ая ЛП: «ударная вязкость» (“КСУ”) будем использовать множество $P_3 = \{\text{«min» (“Min”), «ниже среднего» (“BelowMiddle”), «средний» (“Middle”), «max» (“Max”)}\}$. Производится оценка по 465 бальной порядковой шкале, при которой цифре ≤ 390 соответствует наименьшая оценка, а цифре 465 – наибольшая оценка.

Для второго случая (45 плавок, цеховая технология), в качестве входных параметров системы нечеткого вывода будем рассматривать 7 нечетких лингвистических переменных: «уровень С» (“С”), «уровень Mn» (“Mn”), «уровень Si» (“Si”), «уровень P» (“P”), «уровень S» (“S”), «уровень Al» (“Al”), «уровень Ti» (“Ti”). При этом в качестве выходных (оптимизационных) параметров выступают нечеткие лингвистические переменные «предела текучести» (“Limit”), «балл зерна» (“Ball”) и «ударная вязкость» (“КСУ”). Структурно – логическая модель влияния

«наивысший» (“VeryHigh”). Производится оценка по 0,06 бальной порядковой шкале, при которой цифре 0,023 соответствует наименьшая оценка, а цифре 0,06 – наивысшая оценка.

7-ая ЛП: «уровень Ti» (“Ti”), будем использовать множество $T_6 =$ {«наименьший» (“VerySmall”), «малый» (“Small”), «высокий» (“High”), «наивысший» (“VeryHigh”)}. Производится оценка по 0,015 бальной порядковой шкале, при которой цифре 0,003 соответствует наименьшая оценка, а цифре 0,015 – наивысшая оценка.

В качестве терм-множеств выходных ЛП будем использовать множества P_1, P_2, P_3 .

1-ая ЛП: «балл зерна» (“Ball”) будем использовать множество $P_1 =$ {«min» (“Min”), «средний» (“Middle”), «max» (“Max”)}. Производится оценка по 10 бальной порядковой шкале, при которой цифре $\leq 8,75$ соответствует наименьшая оценка, а цифре 10 – наибольшая оценка, смотри таблицу соответствий 1.1;

2-ая ЛП: «предела текучести» (“Limit”) будем использовать множество $P_2 =$ {«min» (“Min”), «ниже среднего» (“BelowMiddle”), «средний» (“Middle”), «max» (“Max”)}. Производится оценка по 415 бальной порядковой шкале, при которой цифре ≤ 360 соответствует наименьшая оценка, а цифре 415 – наибольшая оценка;

3-ая ЛП: 2-ая ЛП: «ударная вязкость» (“KCU”) будем использовать множество $P_3 =$ {«min» (“Min”), «ниже среднего» (“BelowMiddle”), «средний» (“Middle”), «max» (“Max”)}. Производится оценка по 96 бальной порядковой шкале, при которой цифре ≤ 25 соответствует наименьшая оценка, а цифре 96 – наибольшая оценка.

С учетом сделанных уточнений, рассмотренная субъективная информация о пределе текучести, балле зерна и ударной вязкости, база правил для нечеткого логического контроллера может быть представлена в формате (алгоритм нечеткого вывода Е. Мамдан): 27 правил нечетких продукций для 21 плавки в индукционной печи (см. таблицу 3) и 40 правил для 45 плавок проведенных по цеховой технологии (см. таблицу 4).

Таблица 2

Таблица соответствий фактического балла зерна и оценочной шкалы нечеткого терм-множества «балл зерна»

Фактический балл зерна	Оценочная шкала нечеткого терм-множества «балл зерна»
7,8	8.5
8,7	8.75
7,8,9	9.0
8	9.25
8,9	9.5
9	10

Таблица 3

Таблица правил нечеткой базы знаний, 21 плавка (индукционная печь)

п/п	Входы						Выходы		
	АЛК	Ti	Al	Si	Mn	C	Z	σ_r	KCU
1	VS	VS	S	S	S	H	Min	Min	M
2	S	VS	S	S	S	S	Min	BM	M
3	S	S	S	H	H	S	M	M	Max
4	S	S	M	VS	VS	VS	Max	BM	Max
5	S	S	M	VS	VS	VS	Max	BM	M
6	S	S	M	S	S	S	Max	BM	M
7	S	S	M	M	H	VS	Max	BM	Max
8	S	S	M	H	H	S	M	M	Max
9	S	M	VS	H	VH	H	Max	M	BM
10	S	M	VS	H	VH	H	Max	Max	M
11	S	M	S	VS	VH	H	Min	Max	M
12	S	M	S	VS	VH	H	Min	Max	Max
13	S	M	M	M	H	H	Max	M	Max
14	S	M	H	H	M	S	Min	M	Max
15	S	H	VH	H	M	S	Max	BM	Max
16	M	H	VH	M	M	S	Max	BM	Max
17	M	H	VH	M	M	S	Max	BM	M
18	H	M	S	M	S	H	Max	Max	Min
19	H	M	M	S	S	H	Max	M	M
20	H	M	H	M	M	H	Max	Max	M
21	H	M	S	H	H	H	Max	Max	BM
22	H	M	S	H	H	H	Max	Max	Max
23	H	M	H	H	M	H	Max	M	Max
24	VH	VH	H	H	M	S	Max	Max	Min
25	VH	VH	H	H	M	S	Max	Max	BM
26	S	S	M	VH	M	VS	Max	M	Max
27	S	S	M	VH	M	S	Max	Max	Max

Для формирования базы правил использован полный набор возможных ситуаций и сочетаний лингвистических зависимостей, имевших место при проведении 21 плавки в индукционной печи.

В базе правил приняты следующие сокращения:

По входным сигналам: VS – технологическая величина, является наименьшей; S – технологическая величина, является малой; M – технологическая величина, средней; H – технологическая величина, высокой; VH – технологическая величина, является наивысшей.

По выходным сигналам: M – технологическая величина, является средней; BM – технологическая величина, является ниже средней; Min – технологическая величина, является минимальной; Max – технологическая величина, является максимальной.

Таблица 4

Таблица правил нечеткой базы знаний, 45 плавов (цеховая технология)

п/п	Входы							Выходы		
	C	Mn	Si	P	S	Al	Ti	Limit	KCU	Ball
1	VS	M	S	M	H	S	VS	min	max	M
2	VS	S	M	VS	H	M	H	min	BM	M
3	S	H	S	VS	S	H	S	min	BM	min
4	S	M	M	M	S	S	VS	min	M	min
5	S	H	M	H	H	M	H	min	M	max
6	S	H	M	VH	M	M	S	BM	BM	max
7	S	M	S	M	M	M	S	min	M	M
8	S	H	VS	VS	H	S	H	min	M	M
9	S	M	S	M	S	S	M	min	M	min
10	M	H	S	H	M	S	VS	min	M	max
11	M	H	S	S	VH	S	VS	M	M	M
12	M	VS	M	VS	M	M	S	min	M	min
13	M	H	M	VS	M	M	H	BM	max	M
14	M	VH	M	VS	H	S	S	min	max	M
15	M	M	S	S	VH	M	H	BM	BM	M
16	M	H	S	H	M	S	VS	M	max	M
17	M	VH	M	VS	S	M	M	M	max	max
18	M	S	M	H	VH	M	VS	min	M	max
19	M	M	S	VS	M	M	M	min	max	M
20	M	S	S	VS	H	S	H	min	M	max
21	M	H	M	VH	H	M	S	min	M	min
22	M	M	S	VS	S	M	VS	min	max	M
23	M	H	M	M	H	H	H	min	BM	M
24	M	VH	H	S	M	M	M	BM	M	max
25	H	M	M	VS	M	M	VS	min	M	min
26	H	VH	M	M	M	M	M	min	M	M
27	H	VH	S	M	M	S	VS	min	max	M
28	H	VH	S	H	H	M	VS	min	M	min
29	H	H	M	S	M	M	H	BM	BM	max
30	H	M	M	M	M	S	VS	min	M	min
31	H	M	M	VS	S	S	S	BM	max	M
32	H	VH	M	M	S	M	M	M	M	M
33	H	H	M	M	S	S	VS	min	M	M
34	H	S	VS	VS	M	M	VS	min	M	M
35	H	H	M	VS	H	S	VS	min	BM	M
36	H	VS	M	M	VH	S	VS	min	min	min
37	H	H	M	VS	S	S	VS	min	M	max
38	H	M	M	H	M	M	M	min	M	M
39	H	H	M	H	VH	M	M	M	BM	M
40	VH	M	H	M	M	H	M	BM	M	max

Для формирования базы правил использован полный набор возможных ситуаций и сочетаний лингвистических зависимостей, имевших место при проведении 45 плавов по цеховой технологии.

В базе правил приняты следующие сокращения:

По входным сигналам: VS – технологическая величина, является наименьшей; S – технологическая величина, является малой; M – технологическая величина, средней; H – технологическая величина, высокой; VH – технологическая величина, является наивысшей.

По выходным сигналам: M – технологическая величина, является средней; BM – технологическая величина, является ниже средней; Min – технологическая величина, является минимальной; Max – технологическая величина, является максимальной.

В результате работы с экспертами кафедры Цветной металлургии НМетАУ, г.Днепропетровск были выбраны границы термов и вид функций принадлежности. Так, для решения задачи фаззификации и дефаззификации предлагаются треугольные функции принадлежности в обоих случаях, поскольку входные технологические величины лежат в доступном диапазоне.

В качестве примера, представим совокупность пар функции принадлежности входной переменной «содержание АЛК» и «уровень Mn» (рисунок 4) и функции принадлежности выходной переменной «КСУ» и «предел текучести» (рис. 5).

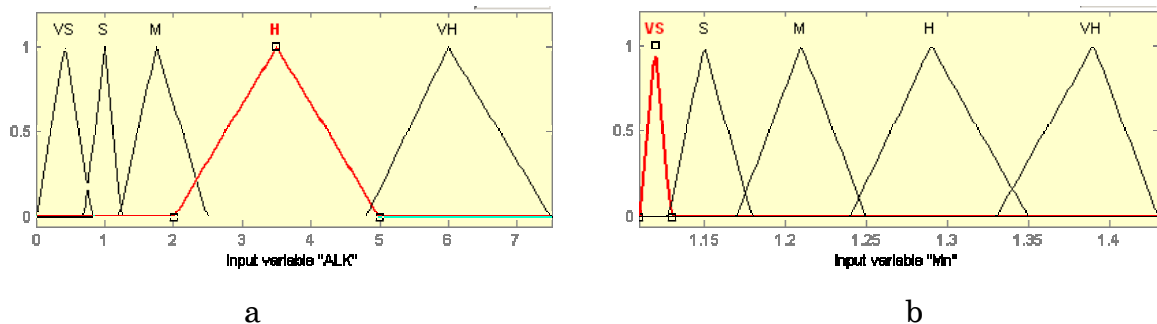


Рисунок 4 - Функции принадлежности входных ЛП: а) «содержание АЛК» и б) «уровень Mn»

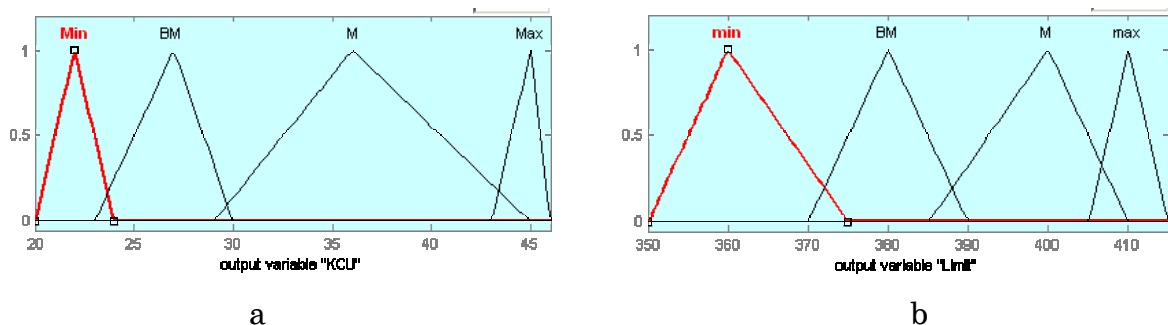


Рисунок 5 - Функции принадлежности выходных ЛП: а) «КСУ» и б) «предел текучести»

Ввиду того, что каждый эксперт, участвующий в формировании баз правил в обоих случаях, является специалистом в развитии конкретно взятой ситуации технологического процесса, то построенная система с

применением ППП FuzzyLogicToolbox входящего в систему MATLAB [8], является концентрацией коллективных знаний. При этом модель обладает синергетическими свойствами и, без сомнений является более эффективной в управлении, чем действия отдельно взятого оператора.

Результат нечеткого моделирования для случая 21 плавка в индукционной печи следующие: содержание АЛК составляет 3,75 кг/т; уровень Ti - 0.02%; уровень Al - 0,035%; уровень Si - 0,475%; уровень Mn – 1,35%; уровень С - 0,205%; балл зерна 9,35 (9,10,8); предел текучести составляет 418 МПа и ударная вязкость KCU – 44.5 при -60 °С.

Таблица 5

Виды поверхностей нечеткого вывода для разработанной нечеткой модели 21 плавка в индукционной печи

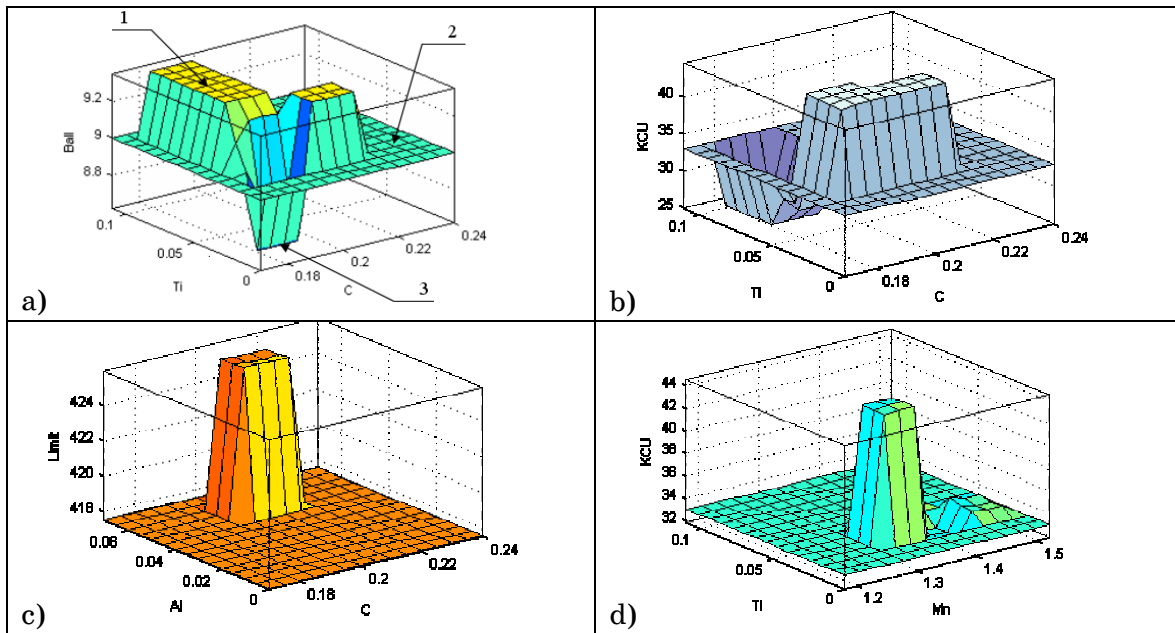
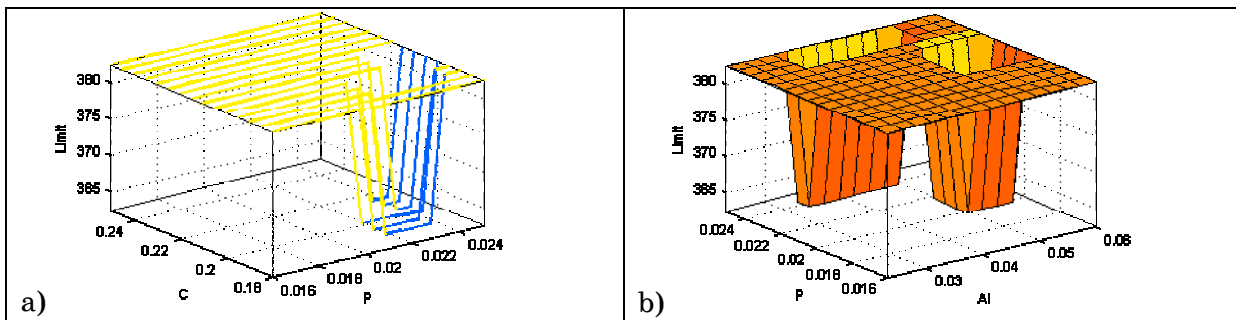
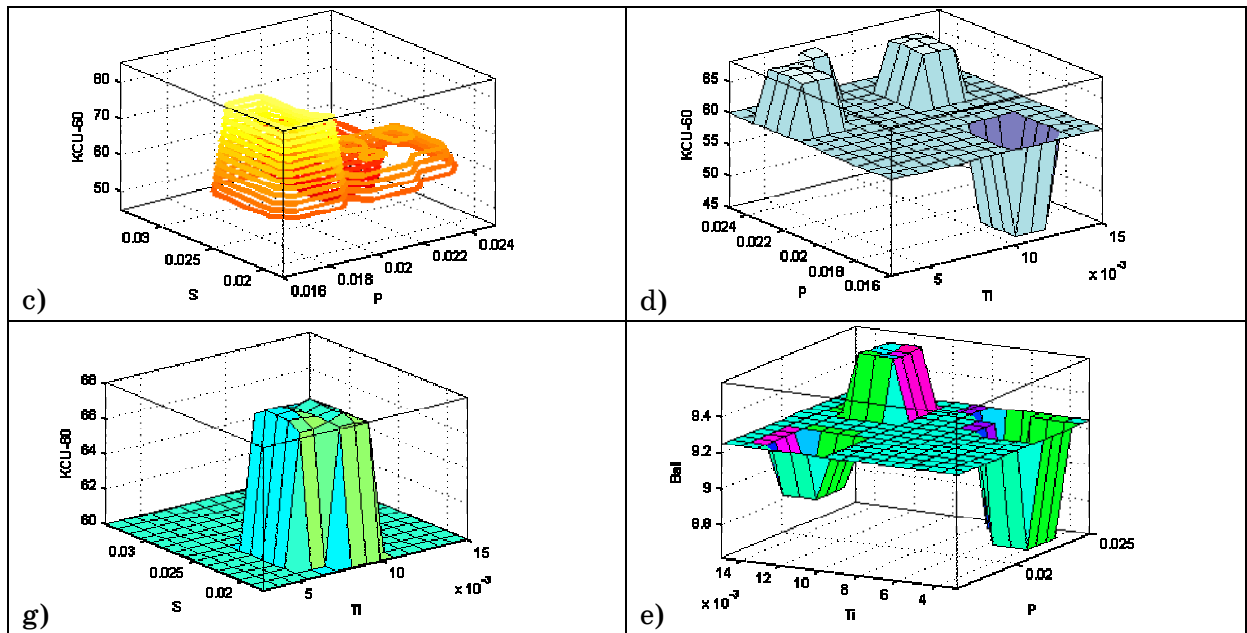


Таблица 6

Виды поверхностей нечеткого вывода для разработанной нечеткой модели 45 плавков, цеховая технология





Для 45 плавки, проведенных по цеховой технологии: уровень С - 0.215%; уровень Mn - 1.27%; уровень Si - 0.495%; уровень P - 0,0205%; уровень S - 0.026%; уровень Al - 0.0415%; уровень Ti - 0.009%; балл зерна 9,25 (8); предел текучести составляет 383 МПа и ударная вязкость КСУ - 60 при -60 °С.

В таблице 5 и 6 представлены примеры поверхностей вывода, и показаны зависимости некоторых входных переменных от выходной для 21 плавки проведенных в индукционной печи и для 45 плавки проведенных по цеховой технологии соответственно. В таблице 5 на поверхности вида (а)) представлена зависимость величины балла зерна от уровня Ti и С с разделением на области. Область 1, является основной и иллюстрирует получение максимального балла зерна по уровню - 9,10,8. Область 2 иллюстрирует обеспечение балла зерна по уровню - 9. Область 3 иллюстрирует получение минимального балла зерна по уровню - 8.

Обобщая полученные результаты, проведем сравнительный анализ технологических факторов влияния на свойства стали марки 20 ГЛ с карбонитридным упрочнением, между модельными результатами полученными на 21 лабораторной плавке проведенных в индукционной печи (с АЛЖ), 45 промышленными плавками проведенными по цеховой технологии (без АЛЖ) и реальными производственными данными, см. таблицу 7.

Таблица 7

Сравнительная характеристика влияния технологических факторов на сталь 20ГЛ по результатам нечеткого моделирования

Технологические факторы	Входы							Выходы		
	ALK, %	C, %	Mn, %	Si, %	Al, %	Ti, %	Ball	KCU при -60°C	Предел текучести (σ_T), МПа	
21 лабораторная плавка, индукционная печь	3.75	0.205	1.35	0.475	0.035	0.02	9.35 (9,10,8)	44.5	418	
45 опытно – промышленных плавок, цеховая технология	-	0.215	1.27	0.495	0.0415	0.009	9.25 (8)	60	383	
Промышленные плавки (Среднее значение)	2.0-4.0 (2.77)	0.19-0.25 (0.217)	1.2-1.56 (1.37)	0.4-0.59 (0.474)	0.03-0.05 (0.043)	0.008-0.029 (0.021)	≥ 8 (8,9)	40-60 (53)	$\geq 380-420$ (400)	
Среднее значение	3.26	0.212	1.33	0.481	0.039	0.017	-	52.5	400	
Абсолютная погрешность Δ_{21} , %	0.98	0.012	0.02	0.001	0.008	0.001	-	8.5	18	
Относительная погрешность ε_{21} , %	35.4	5.53	1.45	0.21	18.6	4.76	-	16.04	4.5	
Абсолютная погрешность Δ_{45} , %	-	0.002	0.1	0.021	0.0015	-	-	7	17	
Относительная погрешность ε_{45} , %	-	0.92	7.3	4.4	3.49	-	-	13.2	4.25	

Вывод

Адекватность полученных результатов на 21 лабораторной плавке, проведенной в индукционной печи, и 45 плавках, проведенных по цеховой технологии, проверена на реальных плавках (см. таблицу 7).

Результаты подтверждают, и по некоторым химическим составляющим улучшают показатели производственных испытаний стали 20 ГЛ с карбонитридным упрочнением.

Применение разработанных нечетких моделей позволяет прогнозировать свойства выплавляемых сталей без больших затрат времени и материальных ресурсов, создает предпосылки для получения в будущем материалов заранее заданными физико-химическими характеристиками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений. — М.: Мир, 1976. — 167 с.
2. Прикладные нечеткие системы: Пер. с япон./ К. Асаи, Д. Ватада, С. Иваи и др.; под редакцией Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугэно. — М.: Мир, 1993. — 368 с.
3. Круглов В.В., Дли М.И., Голунов Р.Ю. Нечеткая логика искусственные нейронные сети: Учеб. пособие. — М.: Издательство Физико-математической литературы, 2001. — 224 с.
4. Новикова Е.Ю. Идентификация процесса выплавки FeSi с использованием алгоритмов нечеткого логического вывода - Нові технології №3(9) – 2005.- 222-224 с.:ил.
5. Бодянский Е.В., Кучеренко Е.И., Михалев А.И. Нейрон- фаззи сети Петри в задачах моделирования сложных систем / Монографія (научное издание). — Дніпропетровськ: Системні технології, 2005. — 311 с.
6. М.И. Гольдштейн, А.В. Гринь, Э.Э. Блюм и др. Упрочнение конструкторских сталей нитридами — М.: Металлургия, 1970-200 с.
7. А.В. Рабинович, Г.Н. Трегубенк, М.И. Тарасьев и др. Теоретические основы и технология оптимального микролегирования электростали азотом титаном и алюминием. — Сучасні проблеми металургії. Наукові праці Том 7. — Дніпропетровськ: „Системні технології”, 2005. — 151 с.
8. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. — СПб.: БХВ — Петербург, 2003. — 736 с.: ил.