

## НЕЧЕТКИЕ АЛГОРИТМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОСТАЛЕЙ ДЛЯ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

**Е.Ю. Новикова, доцент, к.т.н., А.И. Михалев, профессор, д.т.н.,  
Т.В. Михайловская, доцент, к.т.н.,  
Национальная металлургическая академия Украины**

*Аннотация.* Приведены результаты исследования свойств электростали систем, используя методы и алгоритмы нечеткой логики в транспортных приложениях.

*Ключевые слова:* нечеткий алгоритм, функция принадлежности, нечеткий метод.

## НЕЧІТКІ АЛГОРИТМИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОСТАЛЕЙ ДЛЯ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ

**К.Ю. Новикова, доцент, к.т.н., О.І. Михальов, профессор, д.т.н.,  
Т.В. Михайловська, доцент, к.т.н.,  
Національна металургійна академія України**

*Анотація.* Наведено результати дослідження властивостей електросталі, використовуючи методи і алгоритми нечіткої логіки у транспортних додатках.

*Ключові слова:* нечіткий алгоритм, функція приналежності, нечіткий метод.

## FUZZY ALGORITHMS STUDYING THE PROPERTIES ELECTRIC STEELS FOR TRANSPORT SYSTEMS

**K. Novikova, associate professor, cand. eng. sc., A. Mikhalev, professor, dr. eng. sc.,  
T. Mikhaylovskaya, associate professor, cand. eng. sc., National Metallurgical Academy  
of Ukraine**

*Abstract.* This article presents the results of studies electric properties, for transport systems using methods and algorithms of fuzzy logic.

*Key words:* fuzzy algorithm, membership function, fuzzy method.

### 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, микролегированных азотом и ванадием (ниобием) [5].

### Анализ публикаций

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 [3, 4]. В то же время данные свидетельствуют о том, что эта задача может быть успешно решена использованием относительно дешёвых, 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 (применение: диски, звездочки зубчатые венцы и др. детали, к которым предъявляются требования по прочности и вязкости, работающие под действием статических и динамических нагрузок) [5, 6].

Для определения влияния концентраций как базовых элементов, так и микролегирующих добавок на величину зерна и механические свойства стали 20ГЛ с карбонитридным упрочнением, нахождения их оптимальных содержаний с целью снижения расхода легирующих материалов применяются методы и алгоритмы нечеткой логики [1, 2].

### 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 плавков, цеховая технология,

т.е. субъективных оценок экспертов микролегирования электростали 20ГЛ азотом (АЛК), титаном (Ti) и алюминием (Al).

### 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 принадлежно-

сти  $\mu_A(x), \mu_B(x)$ , построенные в пространстве входных значений  $X$  и выходных  $Y$ .

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

В общем случае механизм логического вывода включает четыре этапа:

1. Нечёткость (введение нечёткости, фаззификация). Функции принадлежности, определённые на входных переменных, применяются к их фактическим значениям для определения степени истинности каждой предпосылки каждого правила.

2. Логический вывод. Вычисленное значение истинности для предпосылок каждого правила применяется к заключениям каждого правила. Это приводит к одному нечёткому подмножеству, которое будет назначено каждой переменной вывода для каждого правила. В качестве правил логического вывода обычно используются только операции  $\min$  или  $\text{prod}$ . В логическом выводе  $\text{prod}$  функция принадлежности вывода отсекается по высоте, соответствующей вычисленной степени истинности предпосылки правила (нечёткая логика «И»). В логическом выводе  $\text{prod}$  функция принадлежности вывода масштабируется при помощи вычислений степени истинности предпосылки правила.

3. Композиция. Нечёткие подмножества, назначенные для каждой переменной вывода (во всех правилах) объединяются вместе, чтобы сформировать одно нечёткое подмножество для каждой переменной вывода. При подобном объединении чаще всего применяются операции  $\max$  или  $\text{sum}$ . При композиции  $\max$  комбинированный вывод нечёткого подмножества конструируется как поточечный максимум по всем нечётким подмножествам (нечёткая логика «ИЛИ»). При композиции  $\text{sum}$  комбинированный вывод нечёткого подмножества конструируется как поточечная сумма по всем нечётким подмножествам, назначенным переменной вывода правилами логического вывода.

4. Приведение к чёткости (дефаззификация). На этом этапе нечёткий набор выводов преобразуется в чёткое число.

Алгоритмы нечеткого вывода различаются главным образом видом используемого нечеткого вывода, следующим после фаззификации, и разновидностью метода дефаззификации [4].

Для реализации системы ввода-вывода нечеткой модели процесса микролегирования стали с карбонитридным упрочнением в нечетком контроллере использован алгоритм Мамдани.

При реализации систем нечеткого вывода использованы методы: метод минимального значения логической конъюнкции; метод максимального значения логической дизъюнкции в условиях нечетких правил; метод минимального значения заключения в каждом из нечетких правил; метод максимального значения для агрегирования значений функции принадлежности каждой из выходных переменных для заключения нечетких правил; метод центра тяжести для дискретного множества значений функций принадлежности для выполнения дефаззификации выходных переменных в системе нечеткого вывода типа Мамдани.

### Нечеткое моделирование

В качестве входных параметров системы нечеткого вывода, для первого случая (21 плавка, индукционная печь) будем рассматривать 6 нечетких лингвистических переменных (ЛП): «расход АЛК – азот легирующий комплекс», «уровень Ti», «уровень Al», «уровень Si», «уровень Mn», «уровень C». Для второго случая (45 плавок, цеховая технология) в качестве входных параметров системы нечеткого вывода будем рассматривать 7 нечетких ЛП: «уровень C», «уровень Mn», «уровень Si», «уровень P», «уровень S», «уровень Al», «уровень Ti». При этом в качестве выходных (оптимизационных) параметров выступают нечеткие ЛП «предел текучести» («Limit»), «балл зерна» («Ball») и «ударная вязкость» («КСУ») [3].

С учетом сделанных уточнений, рассмотренная экспертная информация о пределе текучести, балле зерна и ударной вязкости, база правил для нечеткого логического контроллера может быть представлена в формате: 27 правил нечетких продукций для 21 плавки в индукционной печи и 40 правил для 45 плавков проведенных по цеховой технологии.

Для формирования базы правил использован полный набор возможных ситуаций и сочетаний лингвистических зависимостей имевших место при проведении данных плавков.

На рис. 1 изображена одна из поверхностей нечеткого вывода с разбивкой на области [6]. Представлена зависимость величины балла зерна от уровня Ti и C. Область 1 является основной и иллюстрирует получения максимального балла зерна – 9, 10, 8. Область 2 иллюстрирует обеспечения балла зерна – 9. Область 3 иллюстрирует получения минимального балла зерна – 8.

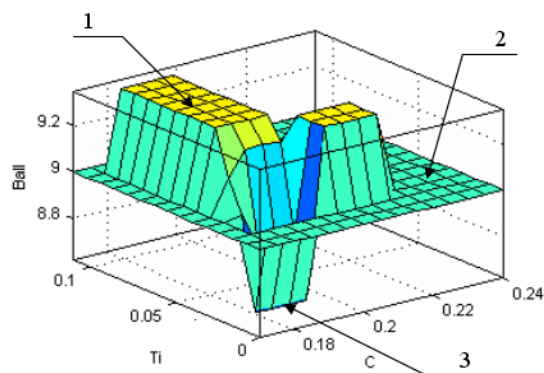


Рис. 1. Поверхность нечеткого вывода

Ввиду того, что каждый эксперт, участвующий в формировании баз правил в обоих случаях, является специалистом в развитии конкретно взятой ситуации технологического процесса, то разработанная система является концентрацией коллективных знаний. При этом модель имеет синергетические свойства и, без сомнений, является более эффективной в управлении, чем действия отдельно взятого оператора.

Результаты нечеткого моделирования для случая 21-й плавки 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 C – 0,205 %; балл зерна – 9, 10, 8; предел текучести составляет 418 МПа и ударная вязкость КСУ – 44,5 при –60 °С. Для 45-ти плавков, которые были проведены по цеховой технологии: уровень C – 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 – 8; предел текучести составляет 383 МПа и ударная вязкость КСУ – 60 при –60 °С.

## Вывод

Обобщая полученные результаты, проведен сравнительный анализ технологических факторов влияния на свойства стали марки 20 ГЛ с карбонитридным упрочнением, между модельными результатами, полученными на 21-ой лабораторной плавке, проведенных в индукционной печи (с АЛК), 45-ти промышленными плавками, проведенными по цеховой технологии (без АЛК) и реальными производственными данными [5]. Результаты подтверждаются, а по некоторым химическим составляющим есть возможность предсказать наилучшие показатели производственных испытаний стали с карбонитридным упрочнением.

Применение разработанных нечетких моделей позволяет прогнозировать свойства выплавляемых сталей без больших затрат времени и материальных ресурсов, создает предпосылки для получения в дальнейшем 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. Круглов В.В., Дли М.И., Голунов Р.Ю. Нечеткая логика искусственные нейронные сети: Учеб. пособие. – М.: Изд-во Физико-математической литературы, 2001. – 224 с.
3. Новикова Е. Ю., Михалев А. И., Бубликов Ю. А. Нечеткая идентификация процесса микролегирования стали с карбонитридным упрочнением // Сучасні проблеми металургії: Наукові праці. – Дніпропетровськ: Системні технології, 2006. – С. 113–127.
4. 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.
5. Гольдштейн М.И., Гринь А.В., Блюм Э.Э. и др. Упрочнение конструкторских сталей нитридами – М.: Металлургия, 1970. – 200 с.
6. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб.: БХВ – Петербург, 2003. – 736 с.

Рецензент: С.Н. Герасин, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 27 августа 2009 г.

---