

УДК 519.62

О.О. Илюнин, С.Г. Удовенко, А.А. Шамраев, А.И. Лазарев
**СИСТЕМА НЕЧЕТКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТРАВЛЕНИЕМ
СТАЛИ С КОМПАРАТОРНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИЕЙ
ДЕФЕКТОВ ПРОКАТА**

Аннотация. В работе предложена нечеткая модель определения дефектов на поверхности металлической полосы и формирования управляющих воздействий, позволяющая улучшить качество управления травлением при существующих ограничениях. Модифицированная схема управления непрерывным травильным агрегатом основана на реализации комбинированного травления с применением компараторной идентификации и нечеткой логики. Сформированы логические правила управления непрерывным процессом селективного и выравнивающего травления для последующего синтеза нечеткого регулятора.

Ключевые слова: травление проката, компараторная идентификация, нечеткий регулятор, функция принадлежности, логические правила управления

Введение

В настоящее время получили развитие исследования, позволяющие формализовать задачи идентификации и управления для технологических процессов (ТП) непрерывного сернокислотного травления полосовой стали на крупных металлургических предприятиях (в частности, на ММК им. Ильича) [1,2,3]. Основными критериями эффективности работы непрерывного травильного агрегата (НТА), применяемого для этих ТП, являются скорость и качество травления (чистота поверхности листового проката на выходе), удельная энергоемкость и ресурсоемкость технологического процесса. Существующие схемы управления НТА имеют ряд недостатков, связанных, прежде всего, с несовершенной схемой идентификации дефектов на поверхности металлической полосы (пятен, участков окалины и вкатышей различной формы), что приводит к товарным потерям из-за выбраковки полос с такими дефектами и снижению скорости ТП. Важным направлением повышения эффективности управления технологиче-

© Илюнин О.О., Удовенко С.Г., Шамраев А.А., Лазарев А.И., 2013

ским процессом непрерывного травления проката, основанным на кислотном удалении окалины с поверхности листовой стали и последующем визуальном контроле качества, является внедрение современных микроконтроллерных средств автоматизации и методов вычислительного интеллекта.

Скорость травления, во многом определяющая производительность и качество данного участка металлургического производства, зависит от двух классов технологических параметров. К первому классу относятся характеристики стали, состав и структура окалины, нечетко зависящие от процессов, предшествующих травлению, и определяющие условия неопределенности технологического процесса. Ко второму классу относятся такие связанные нелинейными взаимограничениями параметры, как концентрация кислоты $C_{H_2SO_4}$ и солей железа C_{Fe} в растворе, температура раствора $T_{p-ра}$, время контакта дефекта с травильным раствором (скорость сматывания) $v(t)$ и давление P_t при контакте раствора с дефектной поверхностью. При этом, если задача стабилизации температуры раствора $\Delta T_{p-ра}$ с приемлемой для процесса погрешностью ($\Delta T_{p-ра} = \pm 1^\circ C$) и снижением энергоемкости на 60-70% уже реализована на практике, то задача управления концентрацией травильного раствора (КТР) представляет теоретический и практический интерес для металлургических предприятий Украины, традиционно применяющих для травления серную кислоту [2].

Существующие методы повышения качества травления основаны, как правило, на статистическом подходе к техническому анализу дефектов проката. Например, в работе [4] при управлении НТА предлагается использовать базу данных (БД), формируемую и постоянно пополняемую путем сбора статистики по выборке рулонов из партии. Начальные параметры регулятора, наиболее близкие к эталонам БД, устанавливаются для всей партии на основании косвенных измерений при стехиометрическом анализе отработанного раствора. В ходе ТП параметры анализируются и по комплексному критерию чистоты поверхности Z поддерживаются в оптимальном режиме. В работе [1] предложен классификатор, описывающий наборы несистемных дефектов на выходе НТА в виде кортежей (<форма, ширина(диаметр),

цвет(оттенок серого), контраст, длина>). По частоте регистрации определенных кортежей на контрольном рулоне из партии проката производится настройка и обучение регулятора, предназначенного для устранения дефектов. Отметим, что такие схемы управления НТА малочувствительны к ограничениям по температуре и концентрации в силу стабильности свойств реагентов и не различают несистемные дефекты.

В общем случае сложная взаимосвязь элементов НТА и переменных в функциях, описывающих поведение элементов системы, затрудняет формализацию задач идентификации и управления ТП, что делает целесообразным построение нечетких моделей и правил логического вывода для совершенствования системы управления травлением стали с учетом всех возможных видов дефектов проката.

Постановка задачи

Целью настоящей работы является разработка процедуры определения дефектов на поверхности металлической полосы и формирования управляющих воздействий по их устранению при существующих ограничениях для параметров ТП. При этом необходимо решить следующие задачи:

- разработать модель ТП комбинированного травления с избирательным действием в начальные периоды и выравнивающим действием в конце процесса с применением компараторной идентификации и нечеткой логики;
- разработать набор логических правил управления (ЛПУ) для последующего синтеза нечеткого регулятора НТА.

Решение задачи

Общий принцип работы системы управления ТП с нечеткой логикой состоит в следующем: числовые значения измерений фазифицируются (переводятся в нечеткий формат), обрабатываются с помощью базы правил или логических правил управления системы, дефазифицируются и в виде физических сигналов подаются на исполнительные устройства.

В связи с невозможностью точных измерений толщины дефектов σ_n , образующихся как спонтанно, так и системно, в работе [2] предлагается оценивать значения σ_n в виде лингвистической переменной, которая задается набором из трех компонент:

$$\langle Id, X, R(Y, x) \rangle,$$

где Id – имя признака <цвет дефекта>, X – множество допустимых значений признака, $R(Y, x)$ – нечеткое множество, определенное на множестве X и представляющее собой нечеткое ограничение на числовую оценку значения признака x , обусловленное лингвистической характеристикой Y <толщина дефекта>.

Системные дефекты, выраженные образованием окалины различных оттенков серого цвета по краям рулона металлического проката, можно устранять предварительным орошением раствором через позиционированные сопла с изменяющимся сечением сопла.

Для фаззификации системных дефектов, связанных с образованием оксидных пленок различных цветов по центральной части рулона металлического проката (цветов побежалости), построим нечеткие LR-интервалы, вырожденные до стандартных \wedge -функций принадлежности $\mu_n(y_m)$ с областью определения на интервале $[0, 1]$, определяющей степень принадлежности m -го дефекта к n -му классу по значению признака, характеризующего закономерности количественного проявления толщины дефектов, значения которых находятся в нечетком LR-интервале $\sigma_n = [D_n - c_n; D_n + c_n]$ (таблица 1).

Таблица 1

Значения функции принадлежности

n	y_m = «Цвет побежалости»	$T_{обр.}, ^\circ C$	Толщина оксидной пленки $\sigma_n, \text{Å}$		$\mu_n(y_m)$
			D_n	c_n	
1	Соломенный	220	425	35	0.73
2	Золотистый	230	495	25	0.85
3	Коричневый	240	500	30	0.86
4	Красно-коричневый	250	540	40	1.00
5	Пурпурный	260	595	35	Не оцениваются
6	Фиолетовый	260	660	35	
7	Синий (васильковый)	300	690	40	

Учитывая, что задача поддержания уровня КТР традиционно решается по критерию минимизации расхода кислоты, сформируем ЛПУ концентрацией травильного раствора: «ЕСЛИ((Цвет = y_m) И ($C_{H_2SO_4} <$ необходимой для y_m)), ТО (увеличить $C_{H_2SO_4}$ до необходимой для y_m)».

Дефаззификацию этого ЛПУ осуществим по правилу: «ЕСЛИ ($y_m(t)$ И $C_{H_2SO_4}(t) < a - C_{H_2SO_4}(t) * \mu_n(y_m(t))$) ТО [$C_{H_2SO_4}(t) = C_{H_2SO_4}(t) + \mu_n(y_m(t)) * (a - C_{H_2SO_4}(t))$]» .

Численные ограничения на дефазифицируемые ЛПУ накладывает расчетная задача поддержания концентрации травильного раствора, представленная типичной MRP-II (Manufacturing Resource Planning) моделью управления запасами, потребляемыми с нечетко определенной скоростью U и пополняемыми до режимного уровня со скоростью V [2]:

$$\frac{dC(t)_{\text{H}_2\text{SO}_4}}{dt} = V - U \quad (1)$$

с обязательным для реального процесса условием $V - U \geq 0$.

Изменение КТР определяется функцией времени $C(t)_{\text{H}_2\text{SO}_4}$, описываемой предложенным в [3] уравнением, которое применительно к рассматриваемой задаче принимает следующий вид:

$$\ln \frac{C(t_{i+1})_{\text{H}_2\text{SO}_4}}{C(t_i)_{\text{H}_2\text{SO}_4}} = A \cdot e^{-(E_a/RT)t}, \quad (2)$$

где $C(t_{i+1})_{\text{H}_2\text{SO}_4}$ – концентрация кислоты в момент времени t_{i+1} ;

$C(t_i)_{\text{H}_2\text{SO}_4}$ – концентрация кислоты в предыдущий момент времени t_i ;

A – предэкспоненциальный множитель в уравнении Аррениуса;

E_a – энергия активации реакции;

R – универсальная газовая постоянная;

T – температура травильного раствора ($^{\circ}\text{K}$);

t – длительность травления проката [t_i ; t_{i+1}].

Уравнение (2) всегда имеет единственное решение, причем повышение точности решения требует уменьшения шага $\Delta t_{\text{изм}}$ (периода измерения концентрации кислоты и оперативного поддержания ее на заданном уровне). Это обеспечивает локальную асимптотическую устойчивость динамической системы химических реагентов.

На рисунке 1 приведена временная диаграмма процесса травления, из которой следует необходимость снижения запаса $C(t)_{\text{H}_2\text{SO}_4}$ до уровня a' [2].

Методика определения нижней границы $C = b'$ приведена в [6].

В момент времени t возникновения ситуации $y_m(t)$ при концентрации раствора $C(t)_{H_2SO_4}$ (с соответствующей оценкой $\mu_n(y_m(t))$) происходит пополнение запаса (внеплановое повышение КТР в интервал времени $[T; 2T]$ за время срабатывания дозатора системы долива) $\Delta t_d = t' - t$:

$$\Delta a(t) = (1 - \mu_n(y_m(t))) \cdot (a' - C(t)_{H_2SO_4}). \quad (3)$$

Интерпретируемое управляющее воздействие графически отражено на рисунке 1, где приняты следующие обозначения:

$[b; a]$ – минимальное и максимальное значения КТР, рассчитываемые по стехиометрическим методикам определения материального баланса для конкретной марки проката;

c – предельно допустимая концентрация солей железа $C(t)_{Fe_2SO_4}$ в травильном растворе, при превышении которой раствор сливают или обновляют путем доливания;

d – минимально допустимое значение КТР, при уменьшении которого раствор не подлежит восстановлению;

a' – минимальный уровень верхней границы КТР при заданном периоде измерения и последующей коррекции $\Delta t_{изм}$;

b' – максимальный уровень нижней границы КТР.

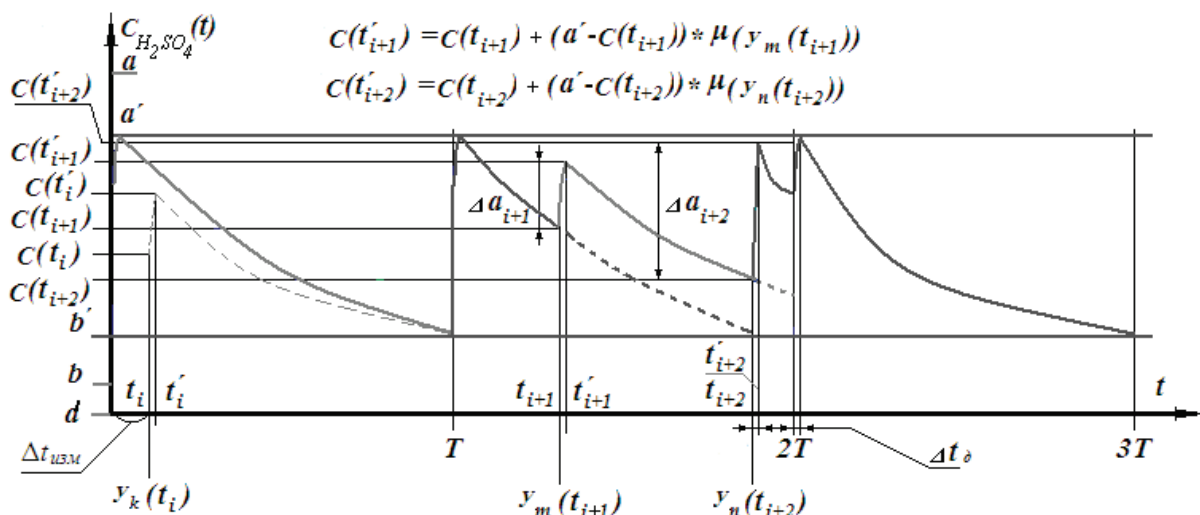


Рисунок 1 – Управление концентрацией раствора по нечеткой модели

Значения a' , b' , $\Delta t_{изм}$ уточняются в процессе настройки синтезируемого нечеткого регулятора.

В работе [7] было отмечено, что скорость реакции (стартовая энергия активации раствора E_a) линейно зависит от корня касательного напряжения потока травильного раствора $\tau_{ct}(P_t)$, создаваемого на поверхности дефекта давлением P_t .

Аналогично была формализована задача травления системных дефектов в виде окалины различных толщин и оттенков серого цвета по краям рулона [8]. Интерпретируемое управляющее воздействие – изменение давления подачи травильного раствора P_i в i -м сопле орошения, позиционно покрывающем координатную область дефекта.

Несистемные дефекты нечетко опишем с помощью функции $\pi_n(z_m)$ с областью определения на интервале $[0,1]$, определяющей степень принадлежности дефекта к n -му классу по значению признака z_m = «черный» в сформированном классификаторе [8].

На рисунке 2 приведена предлагаемая схема нечеткого управления НТА с компараторной идентификацией возможных дефектов на поверхности металлической полосы, подлежащих предварительному селективному и/или сглаживающему системному травлению.

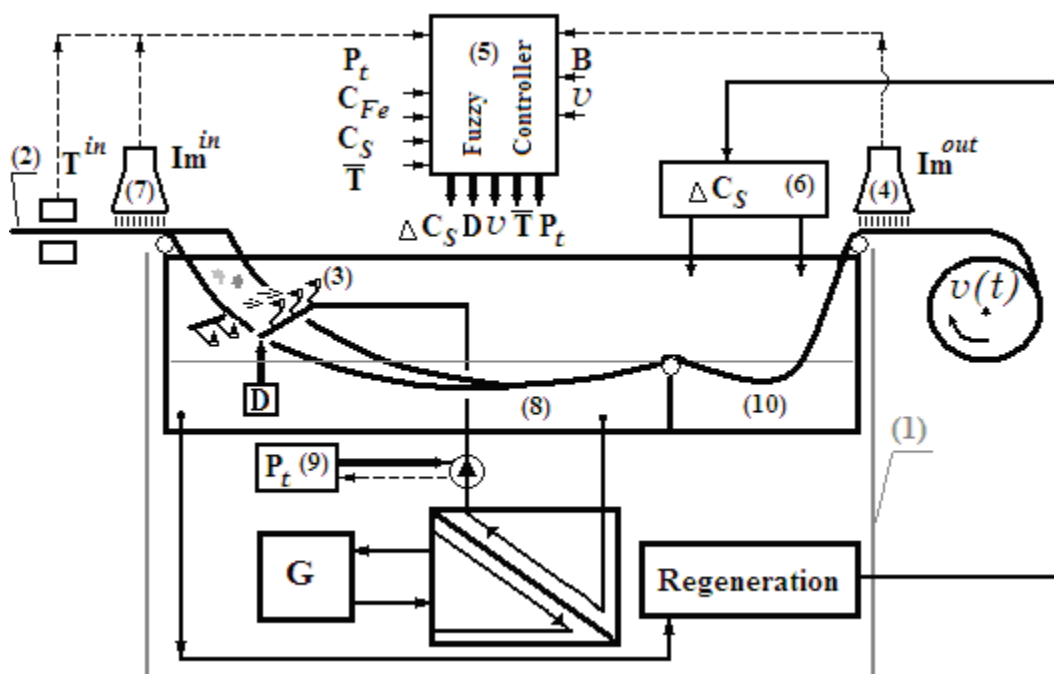


Рисунок 2 – Схема управления НТА с идентификацией и позиционированием несистемных дефектов полосы проката

Схема содержит: 1 – травильный агрегат с узлами нагрева и регенерации травильного раствора и узлом теплогенерации; 2 – металлическую полосу; 3 – блок для подачи травильного раствора через N сопел, расположенных по обеим сторонам плоскости движущейся металлической полосы с регулируемым давлением P_t ; 4 – оптический датчик выходного контроля качества травления металлической полосы с обеих сторон; 5 – блок обработки оптической информации и нечеткого управления технологическим процессом; 6 – дозатор; 7 – оптический датчик входной идентификации и позиционирования несистемных дефектов металлической полосы с обеих сторон; 8 – ванну орошения травильного агрегата; 9 – второй дозатор; 10 – комплекс погружных травильных ванн (или одну травильную ванну).

Получая данные от входного оптического датчика 7, блок 5 определяет позиционные координаты дефекта D^m в виде прямоугольника $(x_1^m, y_1^m) - (x_2^m, y_2^m)$, и подает на блок 3 сигнал для включения сопел N_j ($j=i, i+1, \dots, k$) на период времени $T_j = (y_2^m - y_1^m) / v(t)$. При этом область орошения сопел N_j покрывает дефект D^m на участке полосы шириной $[x_1^m, x_2^m]$. Регулятор 5 формирует также сигнал для дозатора 9 по изменению номинала площади проходного сечения A_j сопла с целью достижения на выходе сопла N_j давления травильного раствора P_t в соответствии со значением функции $\pi_n(z_m = \text{"Цвет"})$.

Интерпретируемое управляющее воздействие представляет собой изменение $C(t)_{H_2SO_4}$ и/или P_t подачи травильного раствора в i -м сопле орошения, позиционно покрывающем координатную область дефекта.

Выводы

Представленная процедура определения дефектов на поверхности металлической полосы и формирования управляющих воздействий позволяет улучшить качество управления травлением при существующих ограничениях. Модифицированная схема управления НТА основана на реализации комбинированного травления с применением компараторной идентификации и нечеткой логики. Применение нечеткой модели травления с избирательным действием в начальные периоды и выравнивающим действием в конце процесса, а также набора полученных ЛПУ позволило синтезировать нечеткий регулятор НТА для сернокислотного травления полосовой стали на ММК

им. Ильича (Мариуполь). Результаты тестирования подтверждают работоспособность рассмотренного подхода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Patent US. Process and equipment for a metal strip pickling / Wielfried Schlechter. – № 6,419,756 B08B 1/02; B08B 7/04, Jul. 4,2002. – 6р.
2. Ілюнін О.О. Управление концентрацией травильного раствора непрерывного травильного агрегата с использованием нечетких LR-интервалов / О.О. Ілюнін, П.А. Капустенко, А.Ю. Перевертайленко, В.А. Тимофеев // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ «ХПІ», 2012. – №2. – С.52-56.
3. Заявка. Пристрій для безперервного травлення прокату листової вуглецевої сталі / О.П. Арсеньєва, О.О. Ілюнін, О.Ю. Перевертайленко, П.М. Подпружников, О.М. Селяков, В.О. Тимофеев. – № U2012-09-428; заявл. 2.08.2012. – 5с.
4. Patent US. Pickling plant and method of controlling the same / Katsumi Mabuchi. – № 6,096,137 B08B 1/02; B08B 3/08, Aug. 1,2000. – 22р.
5. Питеркин С.В. Практика применения EPR-систем / С.В. Питеркин, Н.А. Оладов, С.Н. Исаев. – Альпина Паблишер, 2003. – 368с.
6. Капустенко П.О. До питання автоматизації процесу безперервного травлення листової вуглецевої сталі за умов невизначеності / П.О. Капустенко, О.О. Ілюнін, О.Ю. Перевертайленко, Самар Лага // Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. – Луцьк, 2011. – № 5. – С.100-107.
7. Товажнянский Л.Л. К вопросу о загрязнениях поверхности теплопередачи пластинчатых теплообменников // Л.Л. Товажнянский, П.А. Капустенко. – Энергетика. Известия ВУЗов МВССО СССР. – Минск: БПИ, 1984. – №6. – С.101-102.
8. Ілюнін О.О. Интеллектуальное управление селективным травлением полосового проката / О.О.Ілюнін, П.А.Капустенко, А.Ю.Перевертайленко, В.А. Тимофеев // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ «ХПІ», 2012. – №4/ – С.113-116.