

МОДУЛЬ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ПРОЦЕССА СУШКИ ПОЛИМЕРНОГО ПОКРЫТИЯ ОЦИНКОВАННОЙ ПОЛОСЫ

В. М. ОСКОЛКОВ, И. А. ВАРФОЛОМЕЕВ, Е. В. ЕРШОВ

Череповецкий государственный университет, 162600, Череповец, Россия
E-mail: vasya35@live.ru

Предложен модуль оценки процесса сушки полимерного покрытия оцинкованной полосы, основанный на комплексной оценке кардинальных параметров этого процесса: температурного режима, концентрации паров растворителей, цветового отклонения полимерного покрытия. Для оценки этих параметров построены физические модели, учитывающие особенности применяемого технологического оборудования, — модель теплообменных процессов, происходящих внутри печи сушки; модель испарения растворителей с поверхности полосы в процессе сушки полимерного покрытия; модель прогнозирования цветового отклонения полимерного покрытия с использованием средств машинного обучения, в частности алгоритма „случайный лес“. Оценка каждого из кардинальных параметров представлена отдельным блоком, совокупность которых образует модуль оценки. Выполнена программная реализация модуля и представлены экспериментальные результаты.

Ключевые слова: прокат с полимерным покрытием, сушка полимерного покрытия, программный модуль, модуль оценки, комплексная оценка, прогнозирование, машинное обучение, „случайный лес“, параметрическая идентификация, система поддержки принятия решений

Введение. Оцинкованный стальной прокат с полимерным покрытием (далее — прокат с полимерным покрытием) широко востребован на российском и мировом рынках металлопродукции. Слой цинка предохраняет сталь от коррозии, а полимерное покрытие выполняет декоративную функцию и защищает цинковое покрытие от внешней среды. Прокат с полимерным покрытием производят в непрерывном агрегате полимерных покрытий (рис. 1).

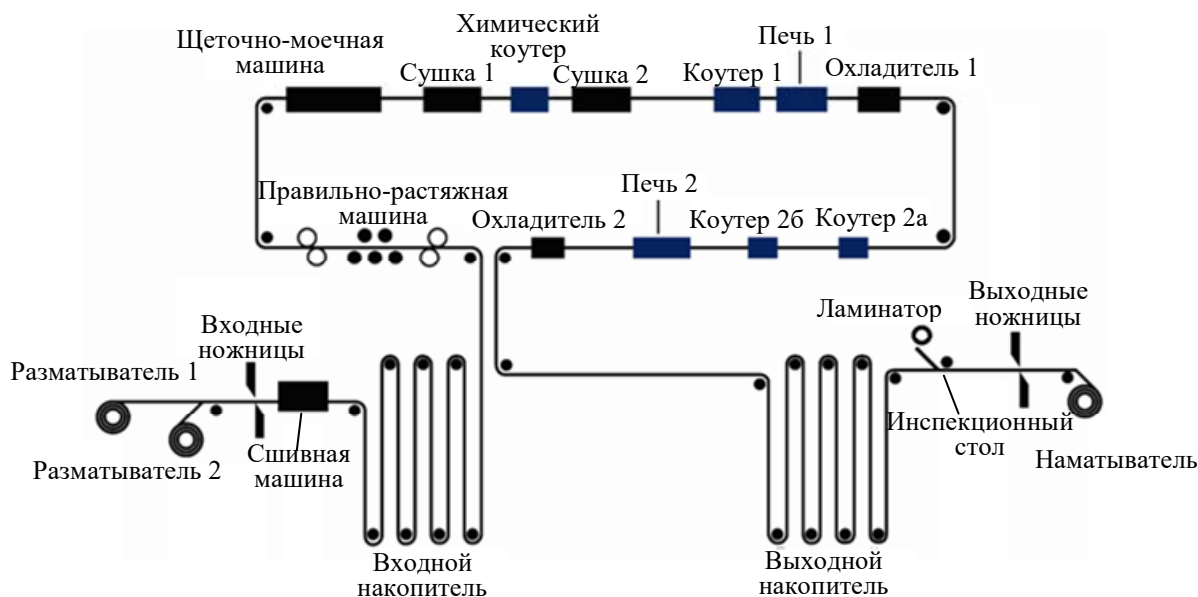


Рис. 1

В агрегате холоднокатаная горячеоцинкованная полоса последовательно проходит основные этапы подготовки поверхности: чистка с помощью щеточно-моечной машины, сушка поверхности, нанесение конверсионного покрытия с помощью химического коутера. Далее полоса заходит в специальное устройство — коутер покрытия, в котором происходит нанесение грунтовки на лицевую и обратную стороны полосы валковым методом. После этого полоса попадает в печь сушки грунтовочного слоя. Печь состоит из семи зон нагрева, в каждой из которых поддерживается установленная оператором температура с помощью подачи природного газа. Сушка покрытия осуществляется за счет нагрева полосы до пиковой температуры металла (ПТМ). При нагреве происходит адгезия покрытия и интенсивное испарение растворителя с поверхности полосы. Далее наносится и сушится отделочный слой покрытия с помощью аналогичных устройств. Допустимый интервал ПТМ определяется производителем лакокрасочного материала (ЛКМ). Соблюдение температурного режима является необходимым условием для получения продукции, отвечающей требованиям по качеству, основные из которых — адгезия и цветовое отклонение. После сушки отделочного слоя полоса попадает на инспекционный стол, где осуществляется отбор проб для проведения испытаний на соответствие продукции требованиям ГОСТ 34180-2017, а также производится порезка и смотка полосы в рулоны.

Для проката с полимерным покрытием, производимого российскими компаниями, отмечается повышенное 5—18%-ное отклонение от требований заказчика или указанного стандарта по одному или нескольким аттестуемым параметрам качества по сравнению с покрытиями, производимыми зарубежными компаниями (0,28 %) [1].

Одним из основных отклонений от требований является цветовое отклонение оттенка готовой продукции в поставляемых заказчику партиях [1]. На цветовое отклонение влияют следующие параметры: химический состав ЛКМ, толщина слоя наносимого покрытия и несоблюдение температурного режима покрытия, что может привести к температуре, не обеспечивающей полимеризацию.

Как показывает накопленный опыт, для оценки технологических процессов используются различные группы методов: метод непрерывного контроля технологических параметров [2—4], аттестационные методы [5, 6], метод компьютерного моделирования [7, 8], методы на основе статистических моделей [9, 10]. Установлено, что для комплексной оценки процесса сушки полимерного покрытия оцинкованной полосы недостаточно использования одной группы методов вследствие взаимовлияния большого количества параметров протекающих процессов. Для оцениваемых параметров с известными физическими зависимостями необходимо использовать методы физического моделирования с применением параметрической идентификации для адаптации физической модели к используемому технологическому оборудованию. К таким параметрам относятся температурный режим и концентрация паров растворителей. Для оценки цветового отклонения физическое моделирование затруднено, поэтому необходимо использовать статистические методы.

В этой связи разработка модуля комплексной оценки процесса сушки полимерного покрытия по таким критериям, как температурный режим ЛКМ, взрывоопасность и цветовое отклонение, представляется актуальной научно-технической задачей.

Цель настоящей статьи — увеличение энергоэффективности и уменьшение доли бракованной продукции за счет повышения точности оценки процесса сушки полимерного покрытия оцинкованной полосы на основе методов математического моделирования, оптимизации и машинного обучения.

Структура модуля. Модуль оценки процесса сушки полимерного покрытия оцинкованной полосы согласован с программным обеспечением и состоит из трех основных компонентов — блока оценки температурного режима, блока оценки концентрации паров растворителей и блока оценки цветового отклонения полимерного покрытия.

Блок оценки температурного режима предназначен для определения пиковой температуры металла $T_{ПТМ}$ согласно требуемым по сертификату на краску значениям, соответствующим заданной температуре внутри печных зон, заданной скорости производства и заданному сортаменту продукции. Соблюдение требуемого температурного режима позволит обеспечить наилучшую полимеризацию ЛКМ. Параметрическая адаптация модели производится на основе статистических данных о производстве.

Для смеси растворителей, содержащихся в ЛКМ, в блоке оценки концентрации паров растворителей выполняются расчеты следующих параметров: нижнего предела взрывоопасности — предела концентрации воздушно-газовой смеси, ниже которой смесь не может воспламениться, и температуры самовоспламенения T_v смеси растворителей. Далее определяется достижимость температуры воспламенения: в случае если температура воспламенения может быть достигнута, текущие технологические параметры не могут быть применены в производстве.

Блок оценки цветового отклонения предназначен для предиктивной оценки полного цветового отклонения ΔE . Структура данного блока согласована с алгоритмом машинного обучения „случайный лес“. С помощью этого алгоритма осуществляется построение модели прогнозирования требуемого цвета и марки стали.

Результаты работы трех блоков позволяют комплексно оценить производимую продукцию. На рис. 2 представлена структурно-функциональная схема блоков, образующих модуль оценки процесса сушки полимерного покрытия оцинкованной полосы.



Рис. 2

Теоретическая основа блока оценки температурного режима. Сушка полимерного покрытия осуществляется в печи сушки отделочного слоя, где поверхность полосы нагревается за счет конвекции и излучения. Количество теплоты, получаемое за счет конвективного теплообмена, определяется выражением

$$Q_k = (T_b - T_z)k ,$$

где T_b — начальная температура полосы, T_z — температура в печной зоне, k — коэффициент конвективного теплообмена.

Процесс передачи тепловой энергии с помощью ИК-лучей от нагретого тела называется лучистым. Лучистый теплообмен позволяет передавать большое количество теплоты за короткий промежуток времени, что способствует сокращению времени сушки и, следовательно, увеличению производительности линии нанесения полимерного покрытия [11]. Количество теплоты, получаемое полосой за счет лучистого теплообмена, определяется как

$$Q_r = \left(\left(\left(\frac{T_b}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_z}{100} \right)^4 \right) 4,96\varepsilon \right) / (T_b - T_z),$$

где 4,96 — приведенный коэффициент излучения, ε — степень черноты.

Суммарное количество теплоты, получаемое полосой:

$$Q = Q_k + Q_r.$$

Мощность нагрева полосы в печной зоне определяется выражением [12]

$$P_z = K (Q_z F_l + C' B (T'_b - T_b) + Q_l),$$

где K — коэффициент запаса мощности; Q_z — удельный тепловой поток печной зоны; F_l — воспринимающая тепло поверхность полосы; C' — удельная теплоемкость полосы; B — масса полосы; T'_b — температура полосы на выходе из печной зоны; Q_l — суммарные тепловые потери печной зоны.

Температура воздуха в печной зоне после отдачи тепла определяется выражением

$$T_\alpha = T_z - \frac{P_z}{\alpha_{к.м}},$$

где $\alpha_{к.м}$ — коэффициент теплоотдачи конвекцией от газовой среды к металлу.

Блок оценки температурного режима функционально рассчитан на идеальные условия, когда не учитываются некоторые факторы, такие как износ оборудования и тепловые потери внутри печи сушки, вследствие чего полученные с помощью модели значения температур отличаются от реальных. Поэтому дополнительно в данный блок были введены настроечные коэффициенты, для определения которых был использован алгоритм COBYLA (Constrained Optimization by Linear Approximation — ограниченная оптимизация с линейной аппроксимацией). В качестве целевой функции было задано среднеквадратическое отклонение (СКО) ПТМ на наборе данных для обучения:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2},$$

где n — количество элементов в наборе данных; x_i — расчетное значение ПТМ для i -й записи данных; \bar{x} — среднеарифметическое значение ПТМ на всем наборе данных.

Задача оптимизации — определение локального минимума целевой функции ($S \rightarrow \min$).

Для реализации алгоритма адаптации разработано программное обеспечение (Свид. о регистрации программы для ЭВМ № 2018614448 от 03.05.2018). В результате работы программы были вычислены оптимальные коэффициенты (см. таблицу).

Блок модуля	Коэффициенты	Зона нагрева						
		1	2	3	4	5	6	7
Оценка температурного режима	Начальные	1	1	1	1	1	1	1
	Оптимальные	0,977	1,076	1,036	1,06	0,797	0,952	1,038
Оценка концентрации паров растворителя	Начальные	1	1	1	1	1	1	1
	Оптимальные	1,04	0,904	1,075	1,097	0,857	0,849	1,018

Теоретическая основа блока оценки концентрации паров растворителя. Для расчета скорости испарения растворителя с поверхности полосы в единицу времени используется уравнение Кнудсена — Ленгмюра [13]:

$$W = \frac{1}{s} \frac{\partial m}{\partial \tau} = kp \sqrt{\frac{M}{2\pi T}}, \quad 0 < k < 1, \quad (1)$$

где W — скорость испарения; m — масса растворителя; τ — продолжительность испарения; s — площадь поверхности испарения; p — давление пара жидкости; M — молекулярная масса; T — температура поверхности испарения.

Давление p определяется с помощью пьезодатчиков, температура T — с помощью блока оценки температурного режима, значение M представлено в сертификате ЛКМ, поправочный коэффициент k определяется на основе экспериментальных данных, полученных с газоанализаторов.

На основе уравнения (1) определяется масса испарившегося растворителя:

$$\frac{\partial m}{\partial \tau} = skp \sqrt{\frac{M}{2\pi T}}.$$

С учетом известной плотности растворителя (ρ) вычисляется объем испарившихся газов в единицу времени:

$$\frac{\partial V}{\partial \tau} = \frac{\partial m}{\partial \tau} / \rho. \quad (2)$$

На основе уравнения (2) определяется общий объем V испарившегося растворителя за время сушки полимерного покрытия на поверхности полосы.

С учетом известного объема печи ($V_{\text{п}}$) рассчитывается концентрация газов по формуле

$$\eta = V/V_{\text{п}}.$$

Полученная концентрация паров растворителей не должна превышать допустимые пределы, обозначенные в сертификате ЛКМ.

Для блока оценки концентрации паров растворителя была выполнена параметрическая идентификация аналогично блоку оценки температурного режима, полученные оптимальные коэффициенты представлены в таблице.

Теоретическая основа блока оценки цветового отклонения. Для определения цветового различия используется специальное устройство — колориметр, который измеряет цветовое отклонение полученного проката от эталонного образца. Измерение производится в цветовом пространстве CIELAB с помощью цветовых координат L, a, b .

Для каждой цветовой координаты была построена подмодель прогнозирования, после чего полное цветовое различие (рис. 3) рассчитывается как евклидово расстояние

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2},$$

где $\Delta L = L - L_0$, L — координата аттестуемого образца, L_0 — координата эталона; $\Delta a = a - a_0$, a — координата аттестуемого образца, a_0 — координата эталона; $\Delta b = b - b_0$, b — координата аттестуемого образца, b_0 — координата эталона.

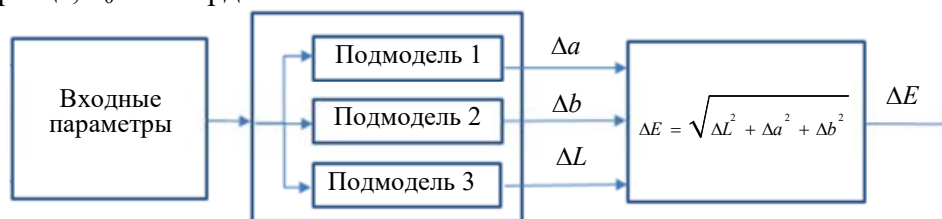


Рис. 3

Входными данными для каждой подмодели являются: данные из сертификата на краску, характеристики входного рулона для покраски, технологические данные с привязкой по длине

полосы. При реализации каждой из подмоделей цветового отклонения используется алгоритм машинного обучения „случайный лес“, [14, 15]. Данный алгоритм базируется на ансамбле решающих деревьев. Дерево принятия решений представляет собой бинарное дерево; ребра („ветки“) дерева — это атрибуты, от которых зависит целевая функция, узлы — атрибуты, по которым различаются рассматриваемые варианты, терминальные вершины („листья“) — значения целевой функции. Общий принцип построения дерева решений состоит из этапа выбора атрибута из входных атрибутов и разбиения значений по этому атрибуту, дальнейшее разбиение производится аналогично. Важным этапом построения является выбор критерия атрибута таким образом, чтобы в результате разбиения получаемые подмножества принадлежали к одному классу [16]. Расчет интервала, в котором содержится результат, производится путем „голосования“ каждого дерева из ансамбля. Пример дерева решений для координаты Δa представлен на рис. 4, где N — количество элементов из набора данных в узле дерева, T_{zi} — температура в i -ой печной зоне, h — толщина полосы, V — скорость движения полосы, Δa — цветовое различие для координаты a цветового пространства CIELAB. Подробно разработка и внедрение модели прогнозирования цветового отклонения полимерного покрытия оцинкованной полосы рассматриваются в работе [17].

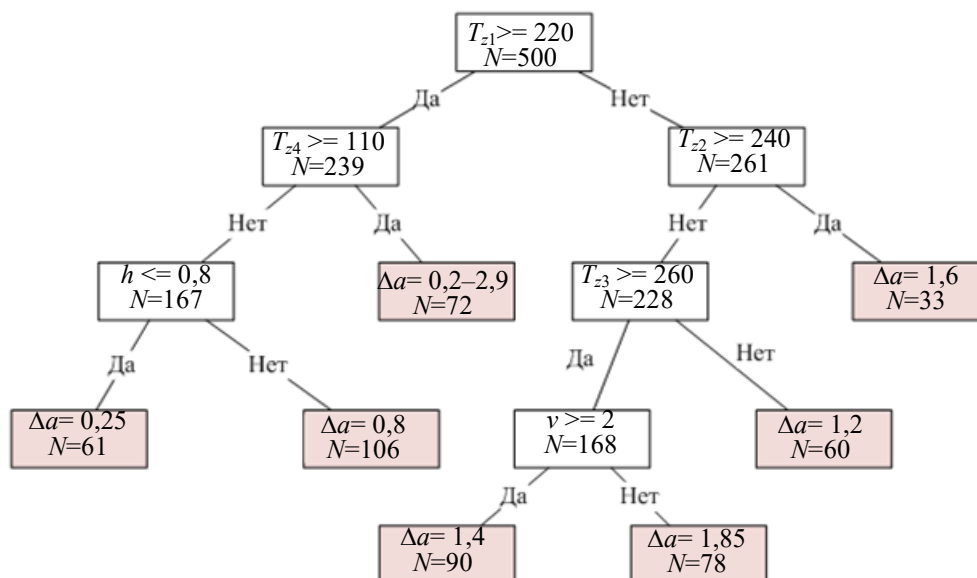


Рис. 4

Эксперимент. Экспериментальные исследования модуля оценки процесса сушки полимерного покрытия проводились в промышленных условиях для проката марки стали 08ПС с полимерным покрытием с цветовым оттенком RAL 8017 (шоколадно-коричневый) как наиболее часто производимого вида продукции. Использование модуля для продукции другого цветового оттенка потребует единоразового переобучения подмоделей, составляющих цветовое отклонение, на основании исторических производственных данных для нового цветового оттенка. Это обусловлено влиянием различных технологических параметров на разные цветовые оттенки.

В результате экспериментальных исследований выявлено: по сравнению с начальными коэффициентами использование оптимальных коэффициентов для блока оценки температурного режима позволяет уменьшить СКО для тестового набора данных с 58,6 до 8,3 °С; использование оптимальных коэффициентов для блока оценки концентрации паров растворителя позволяет уменьшить СКО для тестового набора данных с 0,73 до 0,26 % по сравнению с начальными коэффициентами.

Рассмотрим результаты экспериментального исследования блока оценки цветового отклонения полимерного покрытия. Качество оценивания определяется точностью прогнозиро-

вания цветового отклонения для входного набора данных. Оценка полного цветового отклонения вычисляется по результатам прогнозирования трех подмоделей координат цветового пространства CIELAB. Результаты эксперимента по прогнозированию представлены графиком влияния параметров на цветовое отклонение для координаты a (рис. 5; здесь по оси абсцисс J — среднее уменьшение индекса Джини (или среднее уменьшение неопределенности узла)).

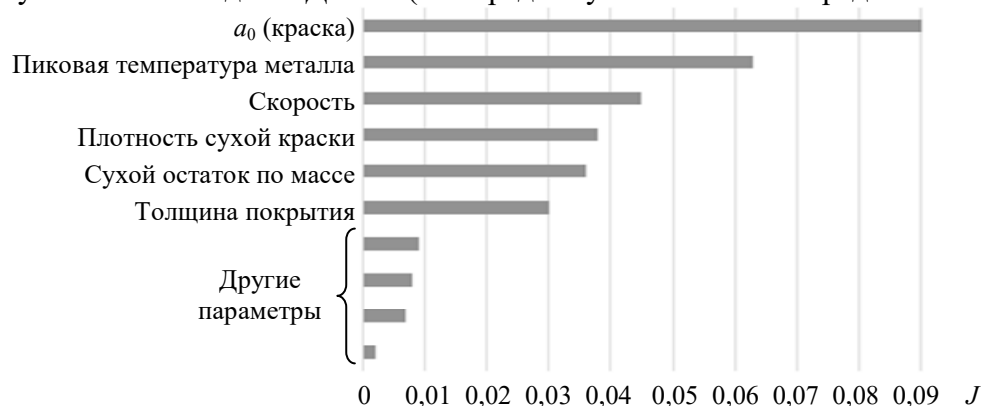


Рис. 5

Как видно из графика, наиболее „влияющими“ параметрами являются координата a_0 цветового отклонения лакокрасочного материала, пиковая температура металла, скорость движения полосы, плотность сухой краски, сухой остаток по массе и толщина покрытия ЛКМ. Остальные параметры имеют незначительное влияние на данную подмодель.

Оценка подмоделей для координат b , L производится аналогичным образом.

Для эксперимента использовался набор данных, которые не фигурировали при построении подмоделей. Расчетные данные по определению полного цветового отклонения сравнивались с фактическими значениями. В результате экспериментального исследования блока оценки цветового отклонения средняя относительная ошибка составила 6,1 %.

Заключение. Разработан модуль комплексной оценки процесса сушки полимерного покрытия оцинкованной полосы. Представлены алгоритмы и программное обеспечение, реализующее предложенный модуль.

Блок оценки температурного режима имеет СКО ПТМ 8,3 °С. Блок оценки концентрации паров растворителя имеет СКО для тестового набора данных 0,26 %. Блок оценки цветового отклонения полимерного покрытия имеет среднюю относительную ошибку, равную 6,1 %.

Достигнутая точность блоков является приемлемой для осуществления комплексной оценки процесса сушки полимерного покрытия, что способствует повышению энергоэффективности и уменьшению доли бракованной продукции агрегата.

Предложенный программный модуль может быть интегрирован в систему поддержки принятия решений по нанесению полимерного покрытия, позволит оператору агрегата получать предиктивную оценку процесса сушки при использовании заданных технологических параметров и увеличить скорость принятия решений по подбору технологических параметров агрегата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Игнатенко Т. Оцинкованный и окрашенный прокат: нерадужные перспективы // *Металлоснабжение и сбыт*. 2015. № 04. С. 36—45.
2. Румянцев М. И., Данилова Д. С., Денисов С. В., Кузьмин А. Л., Стеканов П. А. Анализ параметров и результативности прокатки крупногабаритных листов для судостроения в условиях ОАО „ММК“ // *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования*. 2011. № 1. С. 238—241.
3. Румянцев М. И., Чевардин Ю. А., Шубин И. Г., Пичугин Н. А., Филиппова Е. А. Анализ качества производства холоднокатаной ленты из электротехнической стали с применением методов SPC в условиях ЛПЦ-3 ОАО „Ашинский металлургический завод“ // *Производство проката*. 2010. № 10. С. 24—30.

4. Румянцев М. И., Корнилов В. Л., Носенко О. Ю. Подход к анализу результативности технологии производства проката // *Материалы 66-й науч.-техн. конф.: сб. докл. Магнитогорск, 2008. С. 53—55.*
5. Пилюгина Н. И., Михайловна Т. С., Мозговая Л. В. Контроль качества проката с полимерным покрытием в ОАО „ММК“ // *Вестн. МГТУ им. Г. И. Носова. 2007. № 3. С. 73—75.*
6. Масютина Е. У., Ловцова Е. М. Адгезия как критерий оценки качества внутреннего полимерного покрытия нефтепромысловых труб // *Трубопроводный транспорт: теория и практика. 2015. № 6. С. 8—11.*
7. Castela A. S., Simões A. M. Assessment of water uptake in coil coatings by capacitance measurements // *Progress in Organic Coatings. 2003. Vol. 46. P. 55—61.*
8. Bryant G. F., Butterfield M. H. Simulator assessment of tandem cold-rolling-mill automatic gauge-control systems // *Proc. of the Institution of Electrical Engineers. 1964. Vol. 111. P. 393—405.*
9. González-Marcos A., Alba-Elías F., Castejón Limas M., Ordieres J. Development of neural network-based models to predict mechanical properties of hot dip galvanised steel coils // *Intern. Journal of Data Mining Modelling and Management. 2011. Vol. 3. P. 389—405.*
10. Boqiang L., Zhili D. Promoting energy conservation in China's metallurgy industry // *Energy Policy. 2017. Vol. 104. P. 285—294.*
11. Варфоломеев И. А. Метод и алгоритмы нейро-нечеткого управления многосвязными тепловыми объектами агрегата полимерных покрытий металла: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Череповец, 2013.
12. Логачев М. В., Иваницкий Н. И., Давидович Л. М. Расчеты нагревательных устройств. Ч. 2. Расчеты электрических печей и установок. Минск: БНТУ, 2010.
13. Калажиков З. Х., Калажиков Х. Х., Пономаренко Н. С., Таова Т. М. Кинетика мономолекулярной адсорбции молекул среды на металлической поверхности: Методические разработки. Нальчик: КБГУ, 2004. 37 с.
14. Картиев С. Б., Курейчик В. М. Алгоритм классификации, основанный на принципах случайного леса, для решения задачи прогнозирования // *Программные продукты и системы. 2016. № 2. С. 11—15.*
15. Иванова Е. И. Интеллектуальная информационная система для решения задач прогнозирования неисправностей вагонного оборудования на железнодорожном транспорте // *Программные продукты и системы. 2015. № 4. С. 231—236.*
16. Чистяков С. П. Случайные леса: обзор // *Тр. Карельского научного центра РАН. 2013. № 2. С. 117—136.*
17. Осколков В. М., Варфоломеев И. А., Виноградова Л. Н., Ершов Е. В. Разработка и внедрение модели прогнозирования цветового отклонения полимерного покрытия оцинкованной полосы // *Программные продукты и системы. 2017. № 1. С. 143—147.*

Сведения об авторах

- Василий Михайлович Осколков** — аспирант; Череповецкий государственный университет, кафедра математического и программного обеспечения ЭВМ; E-mail: vasya35@live.ru
- Игорь Андреевич Варфоломеев** — канд. техн. наук; Череповецкий государственный университет, кафедра математического и программного обеспечения ЭВМ; доцент; E-mail: igor.varf@gmail.com
- Евгений Валентинович Ершов** — д-р техн. наук, профессор; Череповецкий государственный университет, кафедра математического и программного обеспечения ЭВМ; заведующий кафедрой; E-mail: ershov_ev@mail.ru

Поступила в редакцию
08.11.2020 г.

Ссылка для цитирования: Осколков В. М., Варфоломеев И. А., Ершов Е. В. Модуль комплексной оценки процесса сушки полимерного покрытия оцинкованной полосы // *Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 1. С. 47—55.*

MODULE FOR A COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE DRYING PROCESS OF THE GALVANIZED STRIP POLYMER COATING

V. M. Oskolkov, I. A. Varfolomeev, E. V. Ershov

*Cherepovets State University, 162600, Cherepovets, Russia
E-mail: vasya35@live.ru*

A software module is proposed for estimating the drying process of the polymer coating of a galvanized strip, characterized by a comprehensive assessment of the basic parameters of the process: temperature condition, solvent vapor concentration, color deviation in the polymer coating. To evaluate these parameters, physical models are constructed accounting for the features of the technological equipment used — a model of heat exchange processes occurring inside the drying furnace, a model of solvent evaporation from the strip surface during the drying of the polymer coating; a model for predicting the color deviation of the polymer coating using machine learning tools, including the "random forest" algorithm. The evaluation of each of the cardinal parameters is represented by a separate block, the totality of which forms the evaluation module. The software implementation of the module is performed, and experimental results are presented.

Keywords: polymer coated rolling, polymer coating drying, software module, evaluation module, integrated assessment, forecasting, machine learning, random forest, parametric identification, decision support system

REFERENCES

1. Ignatenko T. *Metallosnabzheniye i sbyt*, 2015, no. 04, pp. 36–45. (in Russ.)
2. Rummyantsev M.I., Danilova D.S., Denisov S.V., Kuz'min A.L., Stekanov P.A. *Aktual'nyye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya*, 2011, no. 1, pp. 238–241. (in Russ.)
3. Rummyantsev M.I., Chevardin Yu.A., Shubin I.G., Pichugin N.A., Filippova E.A. *Proizvodstvo prokata*, 2010, no. 10, pp. 24–30. (in Russ.)
4. Rummyantsev M.I., Kornilov V.L., Nosenko O.Yu. *Materialy 66-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii sbornik dokladov* (Materials of the 66th Scientific and Technical Conference Collection of Reports), Magnitogorsk, 2008, pp. 53–55. (in Russ.)
5. Pilyugina N.I., Mikhaylovna T.S., Mozgovaya L.V. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2007, no. 3, pp. 73–75. (in Russ.)
6. Masyutina E. U., Lovtsova E. M. *Truboprovodnyy transport: teoriya i praktika*, 2015, no. 6, pp. 8–11. (in Russ.)
7. Castela A.S., Simões A.M. *Progress in Organic Coatings*, 2003, vol. 46, pp. 55–61.
8. Bryant G.F., Butterfield M.H. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 1964, vol. 111, pp. 393–405.
9. González-Marcos A., Alba-Elías F., Castejón Limas M., Ordieres J. *International Journal of Data Mining Modelling and Management*, 2011, vol. 3, pp. 389–405.
10. Boqiang L., Zhili D. *Energy Policy*, 2017, vol. 104, pp. 285–294.
11. Varfolomeev I.A. *Metod i algoritmy neyro-nechetkogo upravleniya mnogosvyaznymi teplovymi ob'yektami agregata polimernykh pokrytiy metalla* (Method and Algorithms for Neuro-Fuzzy Control of Multiply Connected Thermal Objects of the Aggregate of Polymer Coatings of Metal), Candidate's thesis, Cherepovets, 2013, 164 p. (in Russ.)
12. Logachev M.V., Ivanitskiy N.I., Davidovich L.M. *Raschety nagrevatel'nykh ustroystv. Chast' 2. Raschety elektricheskikh pechey i ustanovok* (Calculations of Heating Devices. Part 2. Calculations of Electric Furnaces and Installations), Minsk, 2010. (in Russ.)
13. Kalazhokov Z.Kh., Kalazhokov Kh.Kh., Ponomarenko N.S., Taova T.M. *Methodical developments (Metodicheskiye Razrabotki)*, Nalchik, 2004, 37 p. (in Russ.)
14. Kartiev S.B., Kureichik V.M. *Software & Systems*, 2016, no. 2, pp. 11–15. (in Russ.)
15. Ivanova E.I. *Software & Systems*, 2015, no. 4, pp. 231–236. (in Russ.)
16. Chistyakov S.P. *Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences*, 2013, no. 2, pp. 117–136. (in Russ.)
17. Oskolkov V.M., Varfolomeev I.A., Vinogradova L.N., Ershov E.V. *Software & Systems*, 2017, no. 1, pp. 143–147. (in Russ.)

Data on authors

- Vasily M. Oskolkov** — Post-Graduate Student; Cherepovets State University, Department of Mathematical and Computer Software; E-mail: vasya35@live.ru
- Igor A. Varfolomeev** — PhD; Cherepovets State University, Department of Mathematical and Computer Software; Associate Professor; E-mail: igor.varf@gmail.com
- Evgeny V. Ershov** — Dr. Sci., Professor; Cherepovets State University, Department of Mathematical and Computer Software; Head of the Department; E-mail: ershov_ev@mail.ru

For citation: Oskolkov V. M., Varfolomeev I. A., Ershov E. V. Module for a comprehensive assessment of the drying process of the galvanized strip polymer coating. *Journal of Instrument Engineering*. 2021. Vol. 64, N 1. P. 47–55 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-1-47-55