DOI: 10.17117/na.2016.08.01.181

<http://ucom.ru/doc/na.2016.08.01.181.pdf>

Поступила (Received): 04.08.2016

Варфоломеев И.А., Ершов Е.В. Применение метода Хука-Дживса для расчета оптимальных режимов сушки полимерного покрытия

Varfolomeev I.A., Ershov E.V.
**Application of the Hooke-Jeeves method for calculation of the
optimal modes of drying polymeric coating**

В статье описан подход к моделированию процесса сушки полимерного покрытия оцинкованной полосы. Определена целевая функция, включающая расход газа и коэффициент адгезии. Предложен алгоритм оптимизации режимов сушки полимерного покрытия на основе метода Хука-Дживса. Разработанные модели позволяют добиться снижения расхода газа примерно на 2%

Ключевые слова: метод Хука-Дживса, оптимизация, полимерное покрытие, моделирование

Варфоломеев Игорь Андреевич
Кандидат технических наук, доцент
Череповецкий государственный университет
г. Череповец, пр. Луначарского, 5

Ершов Евгений Валентинович
Доктор технических наук, профессор
Череповецкий государственный университет
г. Череповец, пр. Луначарского, 5

This article describes an approach to modeling the drying process the polymeric coating of galvanized strip. The article defines the target function, which includes the gas flow rate and adhesion coefficient. An algorithm for optimizing the drying parameters of the polymer coating on the basis of the method of Hooke-Jeeves is suggested. The developed models allow achieving the reduction of gas consumption by about 2%

Key words: Hook-Jeeves method, optimization, polymeric coating, modeling

Varfolomeev Igor Andreevich
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Cherepovets state university
Cherepovets, Lunacharskogo ave., 5

Ershov Evgeny Valentinovich
Doctor of Technical Sciences, Professor
Cherepovets state university
Cherepovets, Lunacharskogo ave., 5

Важным этапом в технологическом процессе окраски рулонного металлопроката является сушка ЛКМ в печи агрегата полимерных покрытий. Именно эта стадия влияет на качество конечной продукции. Большой процент брака в данном виде производства связан со слабым прилипанием лакокрасочных материалов (ЛКМ) к поверхности листа, вызванным неправильным температурным режимом сушки. Совершенствование процесса сушки полимерного покрытия на поверхности металлического листа с целью снижения издержек возможно лишь на основе его фундаментального исследования [1].

Управление процессом сушки оцинкованной полосы заключается в задании семи значений температур печных зон ($T_{31}, \dots, T_{37}$), обеспечивающих требуемый температурный режим, при котором температура поверхности полосы на

выходе из печи попадает в интервал рекомендуемых температур полимеризации ЛКМ ($[T_{пол1}, T_{пол2}]$). Это обеспечит максимальный коэффициент адгезии покрытия к подложке. Температуры печных зон зависят от следующих технологических параметров: толщины (h), скорости (V) и начальной температуры ($T_{нач.}$) полосы, плотности (ρ) и теплоёмкости (c) стали. Перечисленные параметры в производстве принято называть рецептом.

На первом этапе была построена математическая модель процесса сушки полимерного покрытия, осуществляющая прогноз температуры поверхности металла ($T_{пов.вых.}$) для заданного набора технологических параметров ($T_{з1}, \dots, T_{з7}, c, \rho, h, V, T_{нач.}$).

$$c\rho h \frac{dT}{dt} = -\eta\sigma(T^4 - T_{sr}^4) - k(T - T_{sr}) \quad (1)$$

где $T_{полосы}$ и $T_{печи}$ – температура стальной полосы и температура печи соответственно, τ – время, η – коэффициент рассеивания энергии при излучении, α_k – коэффициент теплоотдачи при конвекции, σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана. Значения коэффициентов конвективного и лучистого теплообмена были определены на основе экспериментальных данных.

Для точного решения уравнения (1) численными методами была произведена интерполяция функции $T_{печи}(t)$ с помощью полинома Лагранжа. В качестве точек интерполяции использовались температуры в серединах печных зон ($T_{з1}, \dots, T_{з7}$). Решение уравнения (1) с подобранными коэффициентами α_k и η позволяет определить температуру поверхности металла в любой точке печи.

На втором этапе для поиска оптимальных значений технологических параметров построенная математическая модель процесса полимеризации, дополняется формулировкой цели управления, выраженной через критерий качества управления, заданный с помощью целевой функции [2].

Для рассматриваемого процесса полимеризации оцинкованной полосы оптимальный выбор технологических параметров режима сушки должен обеспечивать максимальный коэффициент прилипания при минимальных значениях температур печных зон. На основании этого можно сделать вывод о том, что задача оптимизации технологических параметров процесса сушки окрашенной оцинкованной полосы является многокритериальной. Для построения целевой функции было решено использовать лексикографическое упорядочение, которое является способом ранжирования объектов по значимости в многокритериальной задаче.

Для обоих критериев необходимо осуществлять регулирование температур семи печных зон ($T_{з1} \dots T_{з7}$). Их значения должны быть подобраны таким образом, что температура поверхности ($T_{пов.вых.}$) металла на выходе из печи попадала в интервал рекомендуемых температур полимеризации $[T_{пол1}; T_{пол2}]$ при минимальном значении их суммы.

В результате лексикографического упорядочения было получено выражение (2), позволяющее вычислять значение оценки по совокупности критериев.

$$quality = \frac{adh}{\sum_{i=1}^7 T_{зi}}, \text{ где } adh = \begin{cases} 1, \text{ если } T_{пов. вых.} \in [T_{пол.1}; T_{пол.2}] \\ 0, \text{ если } T_{пов. вых.} \notin [T_{пол.1}; T_{пол.2}] \end{cases} \quad (2)$$

Чем выше значение оценки, полученной с помощью выражения (2), тем более оптимален набор температур печных зон. Таким образом, необходимо осуществить максимизацию оценки по комплексному критерию ($quality(T_{пов.вых.}, T_{з1}...T_{з7}) \rightarrow \max$).

Методы поиска экстремума в основном ориентированы на поиск минимального значения целевой функции. Однако рассматриваемая задача оптимизации заключается в максимизации целевой функции. Задачу максимизации $f(x)$ можно заменить эквивалентной ей задачей минимизации [3]. Получим задачу оптимизации, заключающуюся в минимизации целевой функции:

$$quality = (-1) \cdot \frac{adh}{\sum_{i=1}^7 T_{зi}} \rightarrow \min, \text{ где } adh = \begin{cases} 1, \text{ если } T_{пов.вых.} \in [T_{пол.1}; T_{пол.2}] \\ 0, \text{ если } T_{пов.вых.} \notin [T_{пол.1}; T_{пол.2}] \end{cases} \quad (3)$$

Расчёт значения $T_{пов.вых.}$ осуществляется с помощью математической модели, которая является достаточно сложной. По этой причине осложнено использование методов градиентного спуска, т.к. для определения направления спуска необходимо рассчитать частные производные целевой функции [3].

В методах нулевого порядка для определения направления спуска не требуется вычислять производные целевой функции. Направление минимизации в данном случае полностью определяется последовательными вычислениями значений функции [4].

Для минимизации целевой функции используем метод Хука-Дживса. Суть этого метода состоит в следующем: задаются некоторой начальной точкой $x[0]$. Изменяя компоненты вектора $x[0]$, обследуют окрестность данной точки, в результате чего находят направление, в котором происходит уменьшение минимизируемой функции $f(x)$. В выбранном направлении осуществляют спуск до тех пор, пока значение функции уменьшается. После того как в данном направлении не удастся найти точку с меньшим значением функции, уменьшают величину шага спуска. Если последовательные дробления шага не приводят к уменьшению функции, от выбранного направления спуска отказываются и осуществляют новое обследование окрестности и т.д. [4].

Далее показаны результаты моделирования процесса сушки для двух температурных режимов: заданного и оптимизированного с помощью метода Хука-Дживса. На рисунке 1 кривой 1 показана зависимость температуры поверхности металла от времени нахождения в печи. Линии 2 соответствуют температурам полимеризации ЛКМ, 3 – заданные температуры печных зон.

Как видно из рисунка 1а, при заданном температурном режиме температура поверхности металла на выходе из печи не попадает в интервал температур полимеризации. В результате это приведёт к отслоению покрытия. По этой причине значение целевой функции равно нулю. В данном случае разработанная программа снижает температуры печных зон таким образом, чтобы температура поверхности металла попала в требуемый интервал (рисунок 1б).

Рис. 1. Результаты моделирования а) для заданного температурного режима б) для оптимизированного температурного режима

Результаты оптимизации заданного температурного режима показаны в таблице 1.

Таблица 1. Результаты оптимизации заданного температурного режима

Параметр	Заданный режим	Оптимизированный режим
$T_{з1}, \dots, T_{з7}, ^\circ\text{C}$	270, 320, 330, 395, 390, 390, 280	256, 306, 316, 381, 376, 376, 266
$T_{пол1} - T_{пол2}, ^\circ\text{C}$	240-250	
$T_{пов.вых.}, ^\circ\text{C}$	262	241
$quality \times 10^3$	0	-4,3917

Экспериментальное исследование разработанной программы, осуществляющей оптимизацию температурного режима процесса сушки окрашенной оцинкованной полосы, показало возможность снижения расхода газа на 2 %.

Список используемых источников:

1. Лифшиц В.Г., Оура К., Саранин А.А., Зотов А.В., Катаяма М. Введение в физику поверхности. М.: Наука, 2006. 490 с.
2. Коршунов, Ю.М. Математические основы кибернетики: учеб. пособие для вузов. М., Энергия, 1980. 424 с.
3. Постановка задачи оптимизации и численные методы ее решения.
URL: http://matlab.exponenta.ru/optimiz/book_2/2_1.php
4. Хук Р., Дживс Т.А. Прямой поиск решения для числовых и статических проблем. 1961. С. 212-219.