

УДК. 621.793.5

Методика прогнозирования качества покрытия оцинкованной проволоки

Е.Г. Бузунов, И.Ю. Мезин

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, кафедра технологий, сертификации и сервиса автомобилей

Аннотация. В статье приведено описание разработанной методики прогнозирования качества покрытия оцинкованной проволоки. С использованием статистических моделей найдены рациональные пределы содержания основных химических элементов в стальной заготовке. На основе геометрии конструктивных фракталов произведено математическое моделирование процесса формирования структуры цинкового покрытия. Установлены зависимости толщины железоцинковых фаз покрытия от времени погружения проволоки в расплав, позволяющие прогнозировать свойства покрытия. Данная методика позволяет устанавливать рациональную скорость движения проволоки в агрегате горячего цинкования и получать покрытия требуемого уровня качества.

Abstract. The paper describes the concept of developed methods for forecasting of steel wire zinc coating quality. Rational limits of chemical elements in the steel wire have been found using statistical models. Mathematical modeling of the structure of the zinc coating formation has been made on the basis of the geometry of fractals. Dependence of coating zinc-iron coating phases' thickness and time of steel wire hot-dip galvanizing have been ascertained. This method allows to find rational steel wire moving speed in hot-dip galvanizing unit and to obtain the required level of quality.

Ключевые слова: методика прогнозирования, цинковое покрытие, механизм формирования покрытия, железоцинковые фазы
Key words: methods for forecasting, zinc coating, mechanism of coating formation, zinc-iron phases

1. Введение

Стальная оцинкованная проволока является исходным сырьем для производства воздушных линий связи, электрических проводов и кабелей, рифленой колючей проволоки, тканых и плетеных сеток и других изделий общего назначения. Ее потребительские свойства во многом зависят от способности сопротивляться атмосферной коррозии.

Ввод в эксплуатацию на металлургических предприятиях современных линий горячего цинкования поставил вопрос о необходимости адаптации существующих технологических режимов к новым условиям производства с целью повышения уровня качества выпускаемой продукции, соответствующего настоящим требованиям потребителей. Осуществлять выбор рациональных режимов нанесения цинкового покрытия в промышленных условиях весьма проблематично и экономически не всегда оправдано. Поэтому при установлении технологических режимов цинкования и выборе стальной заготовки требуется иметь методику прогнозирования качества получаемых покрытий при различных условиях производства. Создание такой методики позволит снизить материальные затраты как на подготовку производства, так и само производство, а также уменьшить потери металла, связанные с появлением бракованной продукции. В результате повысится конкурентоспособность отечественной продукции на мировом рынке.

2. Методика статистического управления качеством оцинкованной проволоки

На основе анализа требований к стальной заготовке и покрытию была сформирована структура качества оцинкованной проволоки (рис. 1) и определен основной объективный показатель качества данного вида продукции – масса покрытия.

Обработка статистических данных для агрегата горячего цинкования "ICE" ОАО "ММК-МЕТИЗ" в период пуско-наладочных работ позволила построить x-R контрольные карты процесса горячего цинкования стальной проволоки. В результате анализа полученных контрольных карт было установлено, что среднее значение массы покрытия выходит за пределы верхней и нижней границ регулирования. Это означает, что действующий процесс является нестабильным, и необходимо принять меры для установления причины и внесения соответствующих корректировок в параметры процесса. На рис. 2 представлен пример контрольной карты для процесса нанесения покрытия на стальную проволоку диаметром 2,0 мм при скорости работы агрегата 60 м/мин.

Рис. 1. Дерево свойств оцинкованной проволоки



Рис. 2. Контрольная карта процесса нанесения покрытия на проволоку диаметром 2,0 мм

Поскольку значения массы покрытия, представленные на контрольных картах, были получены при постоянных режимах работы агрегата горячего цинкования, можно сделать вывод, что на изменение массы цинкового покрытия оказывает влияние химический состав заготовки. Широкий интервал значений содержания основных химических элементов в стали приводит к большому разбросу и превышению регламентированных пределов массы покрытия. Таким образом, необходимо установить какие из основных химических элементов, содержащихся в стали, оказывают наибольшее влияние на массу покрытия, а также определить рациональные пределы их содержания.

С применением множественного регрессионного анализа найдена аппроксимация зависимости массы цинкового покрытия от химического состава стальной заготовки и скорости движения проволоки в агрегате. Указанное уравнение имеет вид:

$$m = 188,96 - 233 \cdot C_C - 227,54 \cdot C_{Si} - 0,9 \cdot V, \tag{1}$$

где m – масса покрытия, $г/м^2$; C_C – содержание углерода, %; C_{Si} – содержание кремния, %; V – скорость движения проволоки в агрегате. Для построенного уравнения множественный коэффициент детерминации равен 0,8440. С доверительной вероятностью 95 % полученное уравнение регрессии можно считать статистически надежной аппроксимацией исследуемой зависимости, так как расчетное число Фишера $F_p=10,11$ больше табличного $F[0,05;3;226]=2,64$. Коэффициенты регрессии $b(C_C)=-233$, $b(C_{Si})=-227,54$ и $b(V)=0,9$ являются статистически значимыми, так как соответствующие числа Стьюдента $|t(C_C)|=2,4$, $|t(C_{Si})|=2,42$ и $|t(V)|=4,79$ больше табличного $t[0,05;226]=1,97$.

Поскольку наибольшим отрицательным коэффициентом регрессии является $b(C_C)=-233$, то увеличение содержания углерода в стали приводит к самому значительному снижению массы цинкового покрытия. Вторым по степени влияния на массу покрытия является процент содержания кремния в заготовке $b(C_{Si})=-227,54$. Поэтому необходимо определить рациональные пределы содержания этих элементов в стальной проволоке.

Решение поставленной задачи выполнено с использованием парного регрессионного анализа. Для полученных уравнений установлено, что наилучшим отображением связи между массой покрытия и содержанием углерода и кремния в заготовке является линейная аппроксимация, так как для нее характерно наибольшее различие между расчетным ($F_p=11,3$) и табличным ($F_t=4,02$) числами Фишера. Зависимость массы цинкового покрытия от содержания углерода имеет вид:

$$m = -744,86 \cdot C_C + 161,94. \quad (2)$$

Аналогичная зависимость массы цинкового покрытия от содержания кремния в стальной заготовке будет выглядеть следующим образом:

$$m = -154,38 \cdot C_{Si} + 121,25. \quad (3)$$

Найденные уравнения позволяют установить, что для получения качественного цинкового покрытия массой 90-100 г/м² необходимо снизить содержание основных химических элементов в стальной проволоке. Верхний предел содержания углерода должен быть снижен с 0,12 % до 0,08 %, а верхний предел содержания кремния – с 0,30 % до 0,20 %. Оценка уравнений парной регрессии показала, что они являются адекватными аппроксимациями исследуемых зависимостей и могут быть использованы в прогностическом анализе.

Таким образом, для нанесения покрытия рекомендуется использовать стальную проволоку с меньшим содержанием углерода и кремния.

Согласно ГОСТ 3282, стальная оцинкованная низкоуглеродистая проволока общего назначения должна изготавливаться из стали марки Ст1сп, соответствующей требованиям ГОСТ 380-2005. Однако широкие пределы содержания основных химических элементов в стали не позволяют достичь уровня качества оцинкованной проволоки, соответствующего современным требованиям потребителей. Поэтому чтобы повысить плотность цинкового покрытия и прочность сцепления со стальной основой, предложено снизить содержание углерода и кремния в проволоке. С учетом этих рекомендаций специалистами ОАО "ММК-МЕТИЗ" для агрегата ICE была выбрана проволока из стали марки Ст1сп(М).

Сравнение химических составов проволок указанных марок представлено в табл. 1.

В отличие от стали, изготовленной по ГОСТ 380-2005, требования к марке Ст1сп(М) не допускают значительного отклонения по химическому составу. Более узкие интервалы содержания химических элементов в стали позволяют сделать процесс нанесения покрытия более стабильным. Низкий процент содержания элементов, снижающих плотность покрытия и прочность сцепления с основой, значительно улучшит качество оцинкованной проволоки.

Таблица 1. Химический состав сталей

Марка стали	ГОСТ, ТС	Содержание элементов, %				
		C	Mn	Si	P	S
Ст1сп	ГОСТ 380-2005	0,06-0,12	0,25-0,50	0,15-0,30	≤ 0,04	≤ 0,05
Ст1сп(М)	ТС 14-101-580-2007	≤ 0,08	0,35-0,65	0,15-0,20	≤ 0,04	≤ 0,035

Таблица 2. Динамика процесса диффузии

Шаг	1	2	3	...	K
Длина выбрасываемого отрезка	1/3	1/9	1/27	...	1/3 ^K
Количество отрезков	1	2	4	...	2 ^{K-1}
Общая длина выбрасываемых отрезков	1/3	2/9	4/27	...	2 ^{K-1} /3 ^K

3. Методика прогнозирования структуры покрытия оцинкованной проволоки

Для определения структуры железозинковых фаз в зависимости от времени погружения стальной проволоки в расплав была разработана комплексная математическая модель, описывающая процесс диффузии цинка. Модель основана на теории конструктивных фракталов.

Согласно теории свободного объема (Арсентьев, Коледов, 1976), механизм образования покрытия аналогичен процессу построения фрактала Кантора. Динамику процесса диффузии можно представить в виде отношений, представленных в табл. 2. На K-ом шагу общая длина выбрасываемых отрезков, или объем диффундирующего материала, будет равен:

$$N_K = 2^{K-1}/3^K. \tag{4}$$

Объем диффундирующего материала на каждом шаге будет увеличиваться по закону геометрической прогрессии со знаменателем 2/3. Тогда суммарный объем диффундирующего материала будет равен сумме этой прогрессии:

$$\sum_{i=1}^K a_i = \frac{a_1 - a_K q}{1 - q} = 1 - \left(\frac{2}{3}\right)^K; \tag{5}$$

следовательно, толщина железцинкового слоя h будет равна:

$$h = m (1 - (2/3)^t), \tag{6}$$

где m – масштабный коэффициент, связывающий динамику процесса и линейное измерение толщины слоя, t – время пребывания проволоки в расплаве (Бузунов и др., 2010).

На основании найденных для различных фаз коэффициентов m и уравнения (6) построен график зависимости толщины железцинковых фаз от времени выдержки стальной проволоки в расплаве (рис. 3).

На основе положений теории нестационарной теплопроводности проведена адаптация найденных зависимостей к проволоке различных диаметров. Полученное в результате исследований время нагрева заготовки до требуемой температуры позволило определить скорость движения проволоки в агрегате (рис. 4).

4. Заключение

На основании результатов представленной работы был проведен ряд экспериментов по анализу возможных режимов работы агрегата и использованию стальной проволоки марки Ст1сп(М). Итоги эксперимента оценивались при помощи металлографического анализа образцов оцинкованной проволоки. На рис. 5а представлен пример некачественного цинкового покрытия проволоки диаметром 2,7 мм.

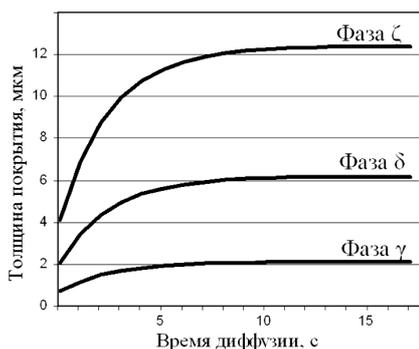


Рис. 3. Зависимость толщины фаз цинкового покрытия от времени погружения в расплав

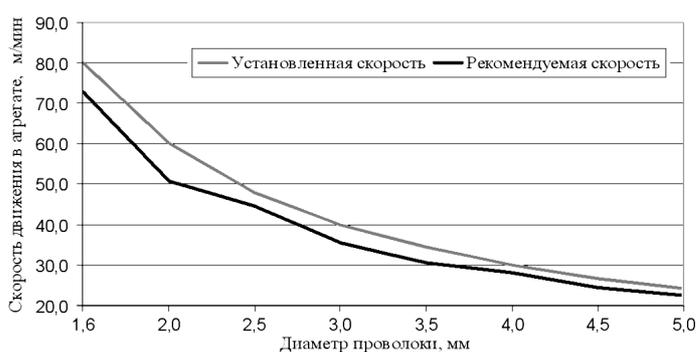


Рис. 4. Существующий и предложенный режимы работы агрегата "ICE" для всего ряда диаметров стальной проволоки

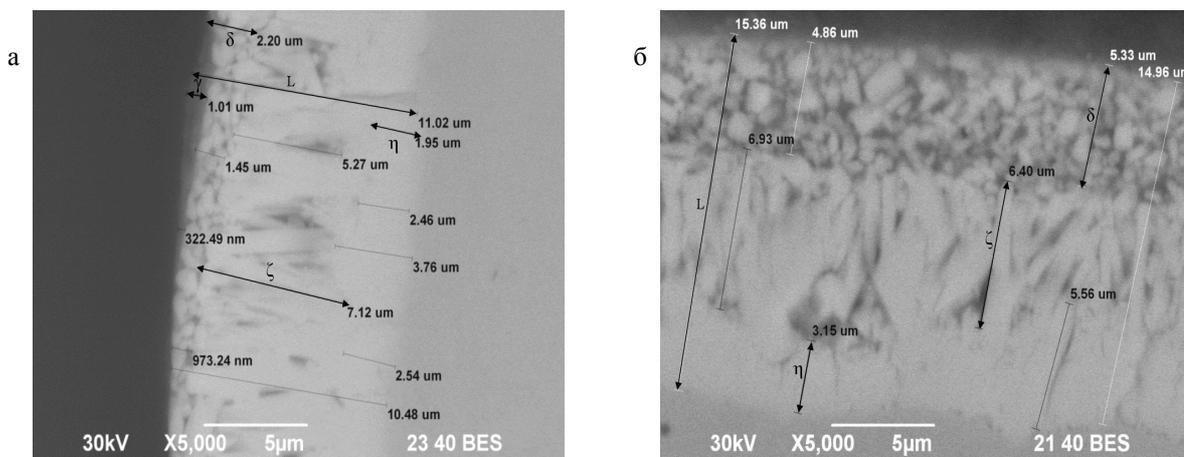


Рис. 5. Структура цинкового покрытия проволоки диаметром 2,7 мм: а – неудовлетворительного качества; б – качественного

На фотографии (рис. 5а) следует обратить внимание на то, что сильно развита хрупкая столбчатая фаза ζ . Ее толщина составляет 7,12 мкм. Это означает, что покрытие обладает слабой адгезией к основному металлу, и при эксплуатации оно начнет отслаиваться. Наиболее пластичная δ -фаза имеет толщину максимум 2,20 мкм, которая очень мала для качественного покрытия. Фаза γ в покрытии практически не наблюдается, но имеется отдельный наплыв, толщиной 1,01 мкм. Тот факт, что эта фаза является очень твердой и наиболее хрупкой, свидетельствует о том, что именно в этом месте произойдет разрушение покрытия при изгибе. Следует также отметить, что на представленных образцах присутствует значительная неравномерность покрытия по длине и по диаметру проволоки. Имеются наплывы покрытия. Толщина фазы чистого цинка варьируется от 1,95 мкм до 7,10 мкм.

Анализ режимов нанесения покрытия, близких к рекомендуемым, показал, что структура железоцинковых фаз изменилась. Значение пластичной фазы δ на проволоке диаметром 2,7 мм увеличилось до 5,33 мкм. Толщина хрупкой фазы ζ уменьшилась до значения 6,4 мкм (рис. 5б).

В улучшенном покрытии толщина фазы δ составляет в среднем 5 мкм, что примерно соответствует толщине хрупкой фазы ζ . Фаза η , содержащая чистый цинк, имеет равную толщину по всему диаметру проволоки. Отсутствуют наплывы покрытия. Это означает, что покрытие получило качественным и удовлетворяет требованиям. По ГОСТ-3282, цинковое покрытие не должно растрескиваться и отслаиваться при спиральной навивке проволоки шестью плотными витками на цилиндрическую оправку диаметром, равным пятикратному диаметру проволоки. Это испытание исследуемые образцы выдерживают с гарантированным запасом (Носов и др., 2008).

Таким образом, реализация разработанных мероприятий позволяет организовать технологический процесс, обеспечивающий требуемый уровень потребительских свойств оцинкованной проволоки. В результате возрастает качество готовой продукции, снижается вероятность появления дефектов, связанных с недостаточным сцеплением покрытия с основой, и достигается требуемая толщина покрытия. Решение существующих проблем в конечном счете благоприятно отражается на затратах, связанных с появлением бракованной продукции, и повысит доверие потребителей.

Литература

- Арсентьев П.П., Коледов Л.А. Металлические расплавы и их свойства. М., *Металлургия*, 1976.
- Бузунов Е.Г., Рубин Г.Ш., Мезин И.Ю. Описание процесса диффузии цинковых покрытий стальной проволоки на основе теории конструктивных фракталов. *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. Магнитогорск, Изд-во МГТУ*, № 1, с.66-67, 2010.
- Носов А.Д., Мезин И.Ю., Зотов С.В., Бузунов Е.Г., Латыпов Р.Т. Анализ условий нанесения цинковых покрытий на проволоку в агрегатах FIB и ICE. Фазовые и структурные превращения в сталях. *Сб. науч. трудов, под ред. В.Н. Урцева, РБ, п. Кусимово*, вып. 5, с.502-507, 2008.