

МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА ПОКРЫТИЯ ОЦИНКОВАННОЙ ПРОВОЛОКИ

Е.Г. Бузунов, И.Ю. Мезин, С.В. Зотов

METHOD FOR PREDICTING THE QUALITY OF STEEL WIRE ZINC COATING

E.G. Buzunov, I.Yu. Mezin, S.V. Zotov

Дано 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.

Ключевые слова: методика прогнозирования, цинковое покрытие, механизм формирования покрытия, железоцинковые фазы.

The article describes the concept of developed methods for predicting of steel wire zinc coating quality. Using statistical models rational limits of chemical elements content in the steel wire are found. Based on the geometry of fractals, mathematical modeling of the structure of the zinc coating formation was carried out. Dependence of the thickness of zinc-iron phases in the coating on the time of steel wire hot-dip galvanizing was ascertained. This method allows to find rational steel wire moving speed in hot-dip galvanizing unit and obtain the required level of quality.

Keywords: prediction method, zinc coating, mechanism of coating formation, zinc-iron phases.

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, в связи с чем при установлении технологических режимов цинкования и выборе стальной заготовки целесообразным является разработка методики прогнозирования качества получаемых покрытий при различных условиях производства.

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 ИСЭ ОАО «ММК-МЕТИЗ» в период пусконаладочных 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.

Поскольку данные значения массы покрытия, представленные на контрольных картах, были получены при постоянных режимах работы агрегата горячего цинкования, анализ контрольных карт позволяет сделать вывод о том, 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

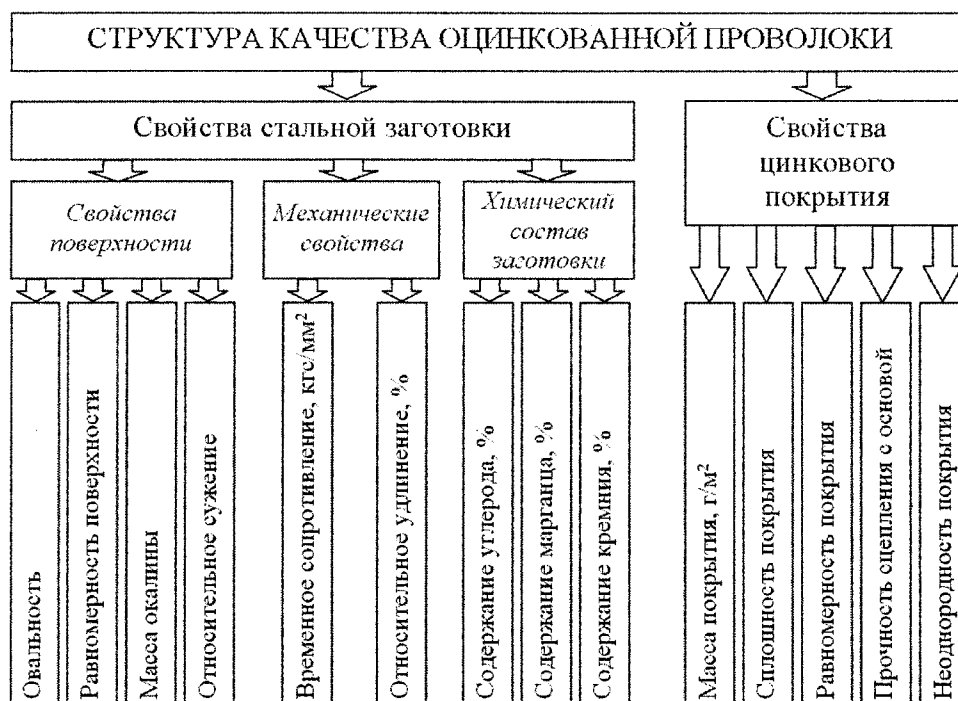


Рис. 1. Дерево свойств оцинкованной проволоки



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

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

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

где m – масса покрытия, г/м²; 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 цинко-

вого 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

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

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

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

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 [1] стальная оцинкованная низкоуглеродистая проволока общего назначения должна изготавливаться из стали марки Ст1сп, соответствующей требованиям ГОСТ 380–2005 [2]. Однако широкие пределы содержания основных химических элементов в стали не позволяют достичь уровня качества оцинкованной проволоки, соответствующего современным требованиям по-

требителей. 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.

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 [3], механизм образования покрытия аналогичен процессу построения фрактала Кантора. Таким образом, динамику процесса диффузии можно представить в виде отношений, представленных в табл. 2.

Таким образом, на K -м шагу общая длина выбрасываемых отрезков или объем диффундирующего материала будет равен

$$N_K = \frac{1}{3^K} \cdot 2^{K-1} = \frac{2^{K-1}}{3^K}. \quad (4)$$

Следовательно, объем диффундирующего материала с каждым шагом будет увеличиваться по закону геометрической прогрессии:

$$a_1 = \frac{1}{3}, \dots, a_K = \frac{2^{K-1}}{3^K}, a_{K+1} = \frac{2^K}{3^{K+1}}. \quad (5)$$

Значит, $a_{K+1} = a_K \cdot \frac{2}{3}$, то есть q (знаменатель прогрессии) будет равен $2/3$. Тогда суммарный объем диффундирующего материала будет равен

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^K a_i &= \sum_{i=1}^K \frac{2^{i-1}}{3^i} = \frac{a_K q - a_1}{q - 1} = \frac{a_1 - a_K q}{1 - q} = \\ &= \frac{\frac{1}{3} - \frac{2^{K-1}}{3^K} \cdot \frac{2}{3}}{1 - \frac{2}{3}} = 1 - \frac{2^K}{3^K} = 1 - \left(\frac{2}{3}\right)^K. \end{aligned} \quad (6)$$

Химический состав сталей

Таблица 1

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	Не более 0,04	Не более 0,05
Ст1сп(М)	ТС 14-101-580-2007	Не более 0,08	0,35–0,65	0,15–0,20	Не более 0,04	Не более 0,035

Динамика процесса диффузии

Таблица 2

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}

Следовательно, толщина железоцинкового слоя

$$h = m \left(1 - \left(\frac{2}{3} \right)^t \right), \quad (7)$$

где m – масштабный коэффициент, связывающий динамику процесса и линейное измерение толщины слоя [4].

На основании найденных для различных фаз коэффициентов m и полученного уравнения (7) построен график зависимости толщины железоцинковых 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).

Таким образом, в рамках выполненных исследований была разработана комплексная методика

расчета и прогнозирования свойств цинкового покрытия на основе статистических моделей, теории конструктивных фракталов, а также теории нестационарной теплопроводности. Блок-схема алгоритма реализации разработанной методики прогнозирования и управления качеством для последующего ее применения в автоматизированных системах проектирования технологических процессов производства оцинкованной проволоки приведена на рис. 5.

На основании предложенной методики была разработана схема управления качеством оцинкованной проволоки (рис. 6).

В данной схеме к исходным технологическим факторам (факторам состояния) относятся все свойства заготовки, которые практически не поддаются регулированию в процессе подготовки и нанесения покрытия. Среди них выделен химический состав и начальные механические свойства [5].

К технологическим факторам процесса цинкования стальной проволоки относятся факторы про-

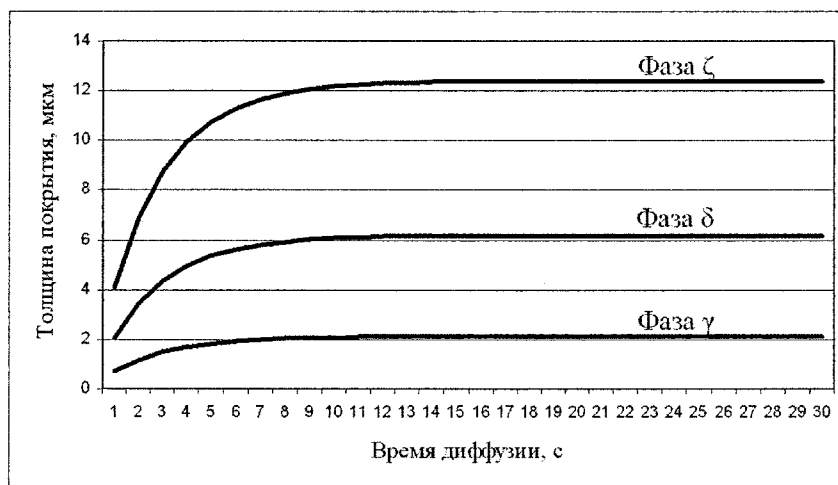


Рис. 3. График зависимости толщины фаз цинкового покрытия от времени погружения в расплав

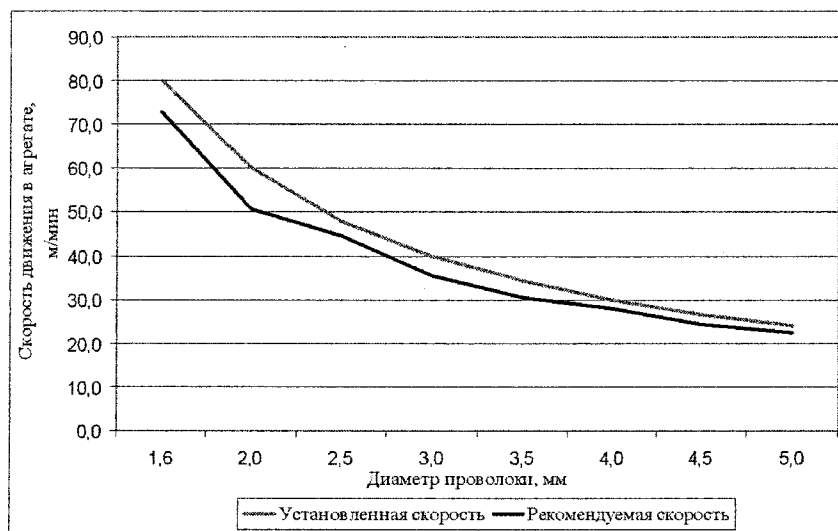


Рис. 4. Существующий и предложенный режимы работы агрегата ICE для всего ряда диаметров стальной проволоки

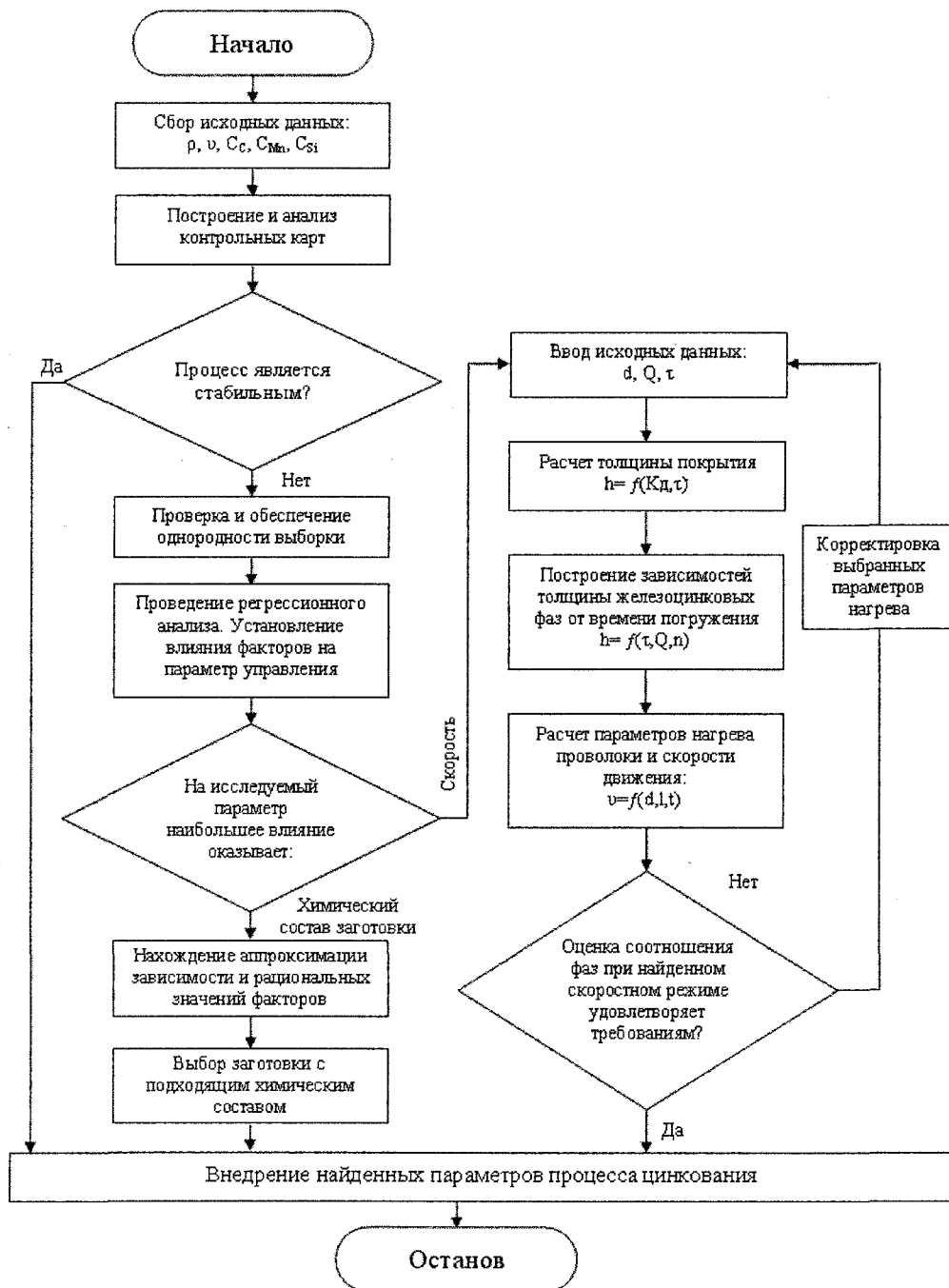


Рис. 5. Блок-схема алгоритма методики прогнозирования качества покрытия

цессов подготовки поверхности и режимы нанесения покрытия. При помощи управления факторами через их совокупный анализ и последующее воздействие можно оказывать влияние на показатели качества оцинкованной проволоки и тем самым управлять качеством выпускаемой продукции.

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. 7, а представлен пример

некачественного цинкового покрытия проволоки, диаметром 2,7 мм.

На фотографии (рис. 7, а) 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,

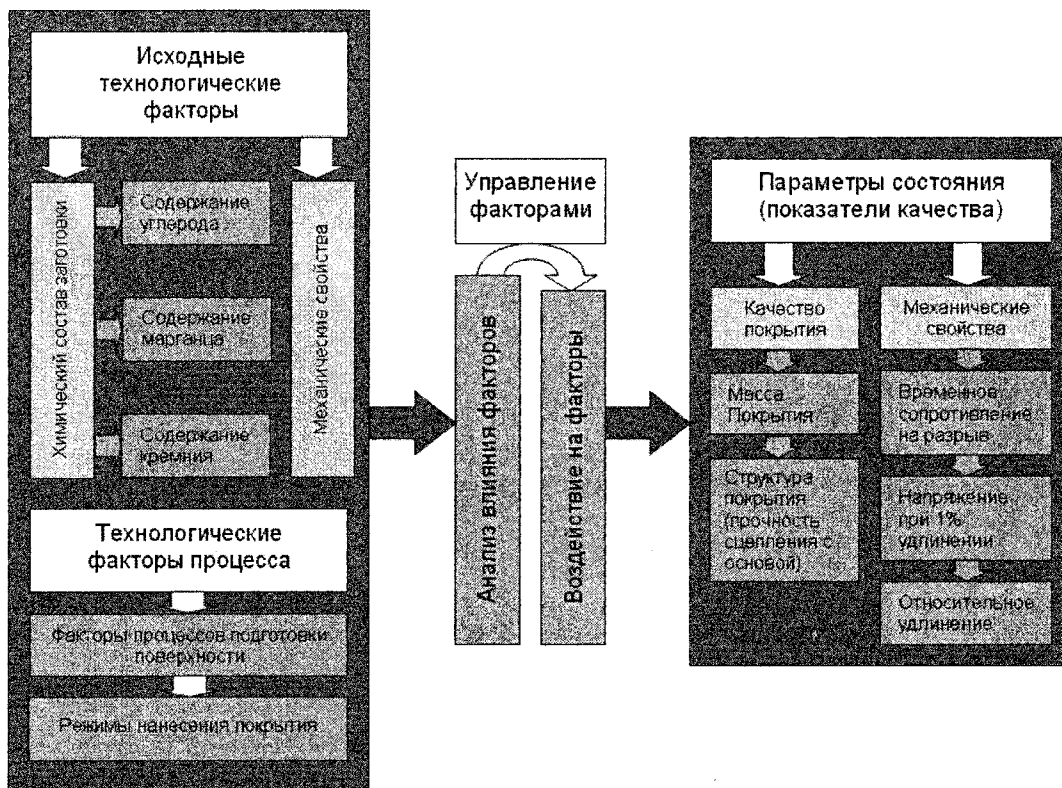


Рис. 6. Схема управления качеством оцинкованной проволоки

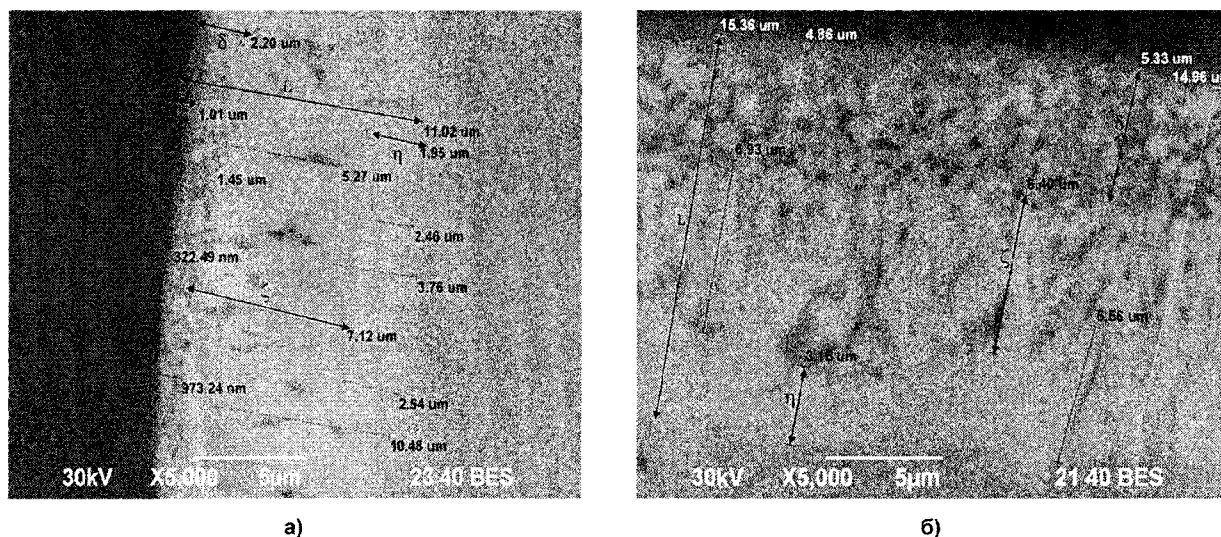


Рис. 7. Структура цинкового покрытия проволоки диаметром 2,7 мм: а – неудовлетворительного качества; б – качественного

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 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 увели-

чилось до 5,33 мкм. Толщина хрупкой фазы ζ уменьшилась до значения 6,4 мкм (рис. 7, б).

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 получилось качественным и удовлетворяет требованиям. По ГОСТ 3282 [1] 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.

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 отразится на затратах, связанных с появлением бракованной продукции, и повысит доверие потребителей.

Литература

1. ГОСТ 3282–74. Проволока стальная низкоуглеродистая общего назначения. – М.: Изд-во стандартов, 1974.

2. ГОСТ 380–2005. Сталь углеродистая обыкновенного качества. – М.: Изд-во стандартов, 2005.

3. Арсентьев, П.П. *Металлические расплавы и их свойства* / П.П. Арсентьев, Л.А. Коледов. – М.: *Металлургия*, 1976.

4. Бузунов, Е.Г. *Описание процесса диффузии цинковых покрытий стальной проволоки на основе теории конструктивных фракталов* / Е.Г. Бузунов, Г.Ш. Рубин, И.Ю. Мезин // *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ, 2010. – № 1. – С. 66–67.

5. *Анализ условий нанесения цинковых покрытий на проволоку в агрегатах FIB и ICE* / А.Д. Носов, И.Ю. Мезин, С.В. Зотов и др. // *Фазовые и структурные превращения в сталях: сб. науч. тр. / под ред. В.Н. Урцева*. – Магнитогорск, 2008. – Вып. 5. – С. 502–507.

Поступила в редакцию 23 сентября 2010 г.