

УДК 21.315

Р.А. ХАЧАТРЯН

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛАКОНАНОСЯЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ЭМАЛИРОВАНИЯ ПРОВОДОВ

Рассматриваются вопросы определения параметров лакононосящих устройств для эмалирования проводов в зависимости от реологических свойств лаков. Разработана технология эмалирования проводов с нанесением на проволоку многослойной изоляции.

Ключевые слова: кабель, изометр, лак, растворитель, электрическое напряжение, емкость.

В настоящее время к эмалированным проводам предъявляется целый комплекс требований (по теплостойкости, водостойкости и др.), обеспечить которые могут только современные конструкции данных проводов и применяемых материалов. В ряде случаев при использовании одного типа лака не удастся получить необходимые параметры эмалированных проводов, поэтому следует применять эмалевое покрытие двух и более слоев [1].

Для решения поставленной задачи требуется разработать технологию эмалирования проводов с нанесением на проволоку многослойной эмалевой изоляции. Одним из ключевых вопросов в указанной технологии является разработка нового лакового узла с применением в нем жесткого разъемного калибра.

Целью настоящей работы является разработка нового лакового узла с учетом неньютоновских свойств применяемых лаков с одновременным трехслойным наложением лаковых покрытий на проволоку.

Анализ литературных данных. Для нанесения покрытия на провода в эмальпроизводстве используют два основных метода – пористых обжимов (для тончайших размеров проводов) и жестких круглых калибров (для толстых размеров).

Метод пористых обжимов. Равномерная стабильная толщина каждого отдельного слоя лака и хорошее качество провода зависят не только от характеристики лака, но и, в первую очередь, от лакононосящей системы. При эмалировании проводов тонких и тончайших размеров используют метод пористых обжимов (фетра, замши) и с помощью фитилей. На основе анализа изучения процесса эмалирования методом пористых обжимов получена зависимость толщины лаковой пленки на проволоке от всех основных технологических параметров процесса [2]:

$$\Delta r = \frac{n \gamma k r_{np} W_0^{3.5}}{\left[(1 + B) \alpha + \frac{7 f r_{np}^2}{\ell n p q} W_0^{2.5} \right] \mu U_0}, \quad (1)$$

где n – количество проходов; γ – содержание сухого остатка в лаке; k – прони-

цаемость пористого материала; r_{np} – радиус голой проволоки; W_0 – равномерная насыщенность пористого материала лаком; $W_0=f(h)$ – изменение насыщенности пористого материала; h – расстояние от свободного уровня лака; B – коэффициент Биверса, характеризующий механическую прочность пористого материала; q – постоянная сила тяжести; μ – вязкость лака; U_0 – скорость эмалирования; f – коэффициент, характеризующий геометрию и размеры лакононосящей системы:

$$\hat{f} = \frac{2\pi h}{b} - \ln \left| 1 - \exp 2\pi \frac{r_{np} + \alpha}{b} \right|. \quad (2)$$

Здесь b – расстояние между проходами эмалируемого провода; a – толщина верхнего пористого прижима.

После выбора этих величин, пользуясь зависимостью $\Delta r = f(\ell)$, определяется такая величина, посредством которой можно получить требуемую толщину эмали-слоя (Δr). На основании теоретических и экспериментальных исследований течения жидкого лака в лаковом узле с пористыми обжимами экспериментально установлено более простое уравнение для инженерного расчета по определению толщины эмали-слоя в зависимости от параметров лакового узла [3]:

$$\Delta r = A \frac{nkdy\ell}{\eta_{эфф} U_0}, \quad (3)$$

где Δr – толщина эмалевого изоляционного слоя; A – коэффициент (определяется экспериментально); d – диаметр эмалируемой проволоки; y – сухой остаток лака; ℓ – длина контакта провода с пористым обжимом.

Для высокоскоростного эмалирования большую роль играет инерционность лакового узла, т.е. время между моментом подачи управляющего воздействия и началом реагирования на него толщины получаемой эмаль-пленки [4]. Время t_0 определяется в виде

$$t_0 = \frac{mW\ell h^2}{6r_n \Delta r U_0}, \quad (4)$$

где m – пористость материала; ℓ – ширина обжима; h – расстояние от уровня лака до проволоки.

Метод жестких калибров. Традиционным методом нанесения эмаль-слоя на провода толстых размеров (диаметром 0,1 мм и выше) является эмалирование проводов с применением в лаковых узлах жесткого круглого калибра. В редких случаях применяют также множество других методов, таких как:

- метод вращающихся роликов;
- капиллярный метод;
- использование электрического поля высокого напряжения и процесса электроосаждения для нанесения изоляции на провод и т.д.

Метод вращающихся роликов представляет собой вращение насаженных на вал роликов с одинаковой скоростью, либо одного цилиндра, имеющего "V" – образную выемку, а также плоской пружины, одним концом закрепленной на

опоре, а другим - упирающейся в ролик и образующей с желобом отверстие треугольной формы для прохождения проволоки и контроля толщины наносимого покрытия. Путем изменения скорости эмалирования и скорости вращения роликов можно регулировать толщину эмаль-покрытия. Данный метод имеет некоторые преимущества по сравнению с методом пористых обжимов:

- исключение из лакового узла пористых материалов;
- отсутствие инерционности лакового узла и т.д.

Однако ему присущи также следующие недостатки:

- ограниченность диапазона размеров эмалируемых проводов (диаметром 0.127...0.56 мм);

- электродвигатели, приводящие в движение проволоку и ролики, могут дать погрешность в скорости до 15%, в соответствии с чем происходит изменение толщины лаковой пленки, что делает ее нецелесообразным для широкого применения в производстве эмаль-проводов [3].

Использование капиллярного метода для получения эмаль-покрытий. Капиллярный метод в основном используют в производстве эмаль-проводов тончайших размеров. Две пластины, расположенные параллельно друг другу и образующие узкую щель для поднятия лака, составляют основную часть лакового узла. С целью получения эмаль-покрытия проволоку пропускают через образованный капилляр. Для капилляра в виде цилиндрической трубки получена формула по определению высоты подъема лака через капилляр за время t [5]:

$$h^2 = \frac{r\alpha \cos\theta}{2\eta} t, \quad (5)$$

где r – радиус капилляра, t – время, η – вязкость лака.

Анализ формулы показывает следующие недостатки данного способа наложения изоляции: во-первых, необходимость использования для эмалирования маловязких лаков, а во-вторых, ограничение в скорости эмалирования, поскольку при больших скоростях капилляр не будет успевать заполняться лаком.

В случае, если капилляр имеет форму узкой щели с постоянной толщиной δ , имеем

$$h^2 = \frac{2\alpha \cos\theta}{\delta\rho g} t, \quad (6)$$

где α – коэффициент поверхностного натяжения жидкости; θ – краевой угол смачивания; ρ – плотность жидкости; g – постоянный коэффициент тяжести лака.

Расчет лакового узла капиллярного типа. Рассмотрим случай, когда лаковый узел используется для эмалирования медной проволоки диаметром 0,020 мм со скоростями $V_1=100$ м/мин, $V_2=10$ м/мин полиуретановым лаком 129 и полиэфирным лаком ПЭ-943. Отметим, что оба лака в настоящее время широко применяются в производстве для эмалирования проводов. Для смачивания стальных пластинок, образующих капилляр, эмаль-лаком прежде всего необходимо выполнение условия $W_{a1} \approx 150 W_{a2}$:

$$W_a = \frac{1}{2} W_k, \quad (7)$$

где W_a – работа адгезии; W_k – работа когезии.

Чем больше относительная работа W_a/W_k , тем лучше происходит смачивание. Необходимым и достаточным условием смачивания является неравенство $\alpha < W_a$. При этом чем ниже α жидкости, тем легче выполняется это условие. Работа адгезии характеризуется взаимодействием двух конденсированных фаз в расчете на единицу площади контакта:

$$W_a = \alpha(1 + \cos\theta). \quad (8)$$

Работа когезии W_k характеризует взаимодействие частиц одной фазы. При изотермическом процессе $W_k = a/2$. В случае выполнения условий (7) и (8) определяем диаметры проволоки, которую можно эмалировать в лаковом узле данной конструкции. При этом должно выполняться условие $W_{a1} = 150 W_{a2}$, где W_{a1} и W_{a2} - работа адгезии в случае контакта эмаль-лака соответственно с металлическими пластинами и медной проволокой. Тогда

$$2S\alpha(1 + \cos\theta) = 1502\pi r_n \ell \alpha(1 + \cos\theta_1), \quad (9)$$

где S - площадь стальной пластинки; r_n - диаметр эмалируемой проволоки; θ_1 - краевого угол смачивания эмаль-лаком медной проволоки.

При условии $\theta \approx \theta_1$ получаем

$$r_n = \frac{1}{150} \cdot \frac{S}{\pi \ell}. \quad (10)$$

Таким образом, диаметр эмалируемой проволоки в лаковом узле капиллярного типа зависит только от геометрических размеров пластин, образующих капилляр. Для капилляра в форме узкой щели имеем максимальную высоту поднятия эмаль-лака:

$$h_0 = \frac{2\alpha \cos\theta}{\delta \rho g}. \quad (11)$$

При внесении в капилляр проволоки высота поднятия эмаль-лака уменьшится и будет равна h . Вес столба жидкости высотой h_0 равен

$$P = \delta b h_0 \rho g, \quad (12)$$

где b - длина металлической пластины.

Вес столба эмаль-лака высотой h равен

$$P' = \delta b h \rho g, \quad (13)$$

где $P - P' = \delta b(h_0 - h)\rho g$ - вес эмаль-лака, уносимого проволокой, но

$P - P' = \rho V_g$; V - объем жидкой пленки эмаль-лака, наносимого на проволоку:

$$V = b\pi(r_{np} - r_n)^2 = b\pi(\Delta r)^2, \quad (14)$$

$$Sgb\pi(\Delta r)^2 = \delta b(h_0 - h)\rho. \quad (15)$$

Отсюда

$$h = \frac{\delta h_0 - \pi(\Delta r)^2}{\delta}. \quad (16)$$

Высота поднятия эмаль-лака по капилляру зависит также от времени (t) и вязкости применяемого эмаль-лака η :

$$h^2 = \frac{\delta \alpha \cos \theta}{2\eta} t. \quad (17)$$

Для круглого калибра получена зависимость

$$\Delta r = r_0 \sqrt{\frac{t^2 - 1}{t^2 - 1}}. \quad (18)$$

где $t = k_0/r_0$.

Расчет разъемного калибра треугольного сечения и определение длины канала калибра. При установившемся изотермическом движении лака в канале калибра, когда отсутствует изменение давления по длине канала, а скорость изменяется только по сечению, уравнение движения сводится к уравнению Лапласа, которое в цилиндрической системе координат имеет вид

$$\frac{\partial^2 U_z}{\partial r^2} + \frac{\partial U_z}{r \partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 U_z}{\partial \phi^2} = 0, \quad (19)$$

со следующими условиями (см. рис.):

$$U_z = 0 \text{ при } r \cos \phi = h_0; \quad U_z = U_0 \text{ при } r = r_0; \quad \left. \frac{\partial U_z}{\partial \phi} \right|_{\phi=0} = 0.$$

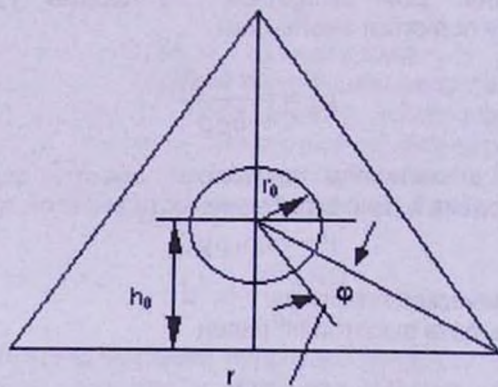


Рис.

Распределение скорости по сечению канала имеет вид

$$U_z = U_0 \left[1 - \alpha \ln \frac{r}{r_0} + \sum_{i=1}^{\infty} R_i(r) P_i(\phi) \right],$$

где $\sum_{i=1}^{\infty} R_i(r) \cdot P_i(\phi)$ - поправка, связанная с изменением геометрии калибра. Для расчета достаточно иметь два числа ряда:

$$U_z = \left\{ 1 - \alpha \ln \frac{r}{r_0} + c_1 \left[\left(\frac{r}{r_0} \right)^2 - \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \right] \cos 3\varphi + c_2 \left[\left(\frac{r}{r_0} \right)^3 - \left(\frac{r_0}{r} \right)^3 \right] \cos 6\varphi \right\}, \quad (20)$$

где c_1, c_2 – некоторые постоянные, определяемые из граничных условий.

Объемный расход лака равен

$$Q = 6 \int_0^{r^*} \int_0^{\varphi_0} U_z r dr d\varphi = \pi [(r_0 + \Delta r)^2 - r_0^2] U_0, \quad (21)$$

где $r^* = h_0 / \cos \varphi$; левая часть уравнения (21) показывает количество лака, поступающего в канал калибра, а правая часть – количество лака, уносимого движущимся проводом.

Исходя из граничных условий и принимая $h_0 = d/2$ ($d = 0,05$ мм), определяются коэффициенты: $a = 2,15$; $c_1 = 0$; $c_2 = -0,04$. Дифференцируя U_z по r , получим

$$\frac{dU_z}{dr} = U_0 \left[-\frac{a}{2} + c_2 \left(\frac{3r^2}{r_0^2} - \frac{3r_0^2}{r^4} \right) \right] = 52,5 U_0. \quad (22)$$

Эмаль-лаки, являющиеся растворами полимеров, обладают неньютоновскими свойствами. Поэтому при расчете основных параметров калибрующего канала необходимо учитывать указанные их свойства. Основными параметрами калибрующего канала являются его длина (L) и сечение. От длины канала зависит сила натяжения проволоки из-за сопротивления в канале [6]:

$$T = \pi (R^2 - r_0^2) L \tau_{R_z}.$$

где T – сила сопротивления, воздействующая на эмалируемый провод: τ_{R_z} – сдвиговое напряжение лака по направлению оси Z (направление движение провода):

$$\tau_{R_z} = \eta_{эфф} \frac{dU_z}{dr} = \eta_{эфф} 52,5 U_0.$$

Принимая $R = 0,32$ мм, $r_0 = 0,05$ мм, $\eta_{эфф} = 0,48$ Нс/мм², $T = 0,03$ Н/мм² (для меди), получим

$$L = \frac{0,03 \text{ Н/мм}^2}{\pi (0,32^2 - 0,05^2) 0,48 \cdot 52,5} = 13,6 \text{ мм}.$$

Таким образом, определена длина калибрующего канала в зависимости от диаметра эмалируемой проволоки, реологических свойств лака, поперечного сечения калибра и скорости эмалирования.

Выводы

1. Анализ существующих систем лаконаносащих устройств для нанесения лаковых покрытий на проволоку с учетом неньютоновских свойств лаков показал целесообразность использования разъемного жесткого калибра в качестве безынерционного лаконаносащего устройства.

2. Исследованы физика течения тонких слоев неньютоновской жидкости через каналы некруглого сечения, а также вопросы смачивания, растекания,

адгезии эмаль-лака к проволоке и кинетики процесса сушки.

3. Проведены расчеты двух типов лакоаносающих устройств, в результате чего:

а) получена зависимость толщины наносимой эмаль-пленки от параметров лакового узла для жесткого разъемного калибра в зависимости от реологических свойств применяемых лаков, поперечного сечения калибра и скорости эмалирования;

б) показано, что лаковый узел капиллярного типа может работать на полиуретановом лаке 129 и полиэфирном лаке ПЭ-943 при эмалировании медной проволоки диаметром 0,02...0,025 мм со скоростью эмалирования $V=100$ м/мин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трезвов В.В. Тенденции усовершенствования лаков для производства эмалированных проводов // Кабели и провода. – М., 2001. – С. 9-10.
2. Холодный С.Д., Берсон В.С. Анализ метода нанесения эмаль-лака с помощью обжимов из волокнистых материалов // Электротехническая промышленность. Сер. Кабельная техника. – 1971. – Вып. 73.
3. Хачатрян Р.А. Разработка и исследование основных процессов технологии эмалирования двухжильных цветных микропроводов: Дис... канд.техн.наук. – М., 1989.
4. Тумин И.М. Устройство для изготовления эмалированных проводов. – М., 1981.
5. Хачатрян Р.А. Разработка метода электрического расчета двухжильных водостойких микроэмаль-проводов // Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 2006. – Т. 59, N3. – С. 589-596.
6. Сумм Б.Д. Горюнов Ю.В. Физико-химические основы смачивания и растекания. – М.: Химия, 1976.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 11.07.2009.

Ռ.Հ. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ

ԼԱՐԵՐԻ ԷՄԱԼԱՊԱՏՄԱՆ ՍԱՐԶԵՐԻ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ

Դիտարկվում են լարերի էմալապատման համար նախատեսված լաքապատող սարքերի պարամետրերի որոշման հարցեր՝ կախված լարի ռելուզիական հատկություններից: Մշակված է լարերի լաքապատման տեխնոլոգիա լարի բազմաշերտ մեկուսացումով:

Առաջադրվող բառեր. մալուխ, մեկուսիչ, լաք, լուծիչ, էլեկտրական լարում, ունակություն:

R.H. KHACHATRYAN

DEFINITION OF LACQUER-SPREADING DEVICE PARAMETER FOR EMANELING WIRES

The problems of defining lacquer-spreading device parameters for emaneling wires are considered. Emaneling wire technology with multilayer emanel isolation spreading on the wire is developed.

Keywords: cable, isolation, lacquer, solvent, electric voltage, capacity.