

УДК 621.315.61

## ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ КАЛИБРОВ ДЛЯ ЭМАЛИРОВАНИЯ КРУГЛОЙ ПРОВОЛОКИ

А.В. Петров, Ю.М. Пыткина\*, Б.М. Такеева

Томский политехнический университет

\*ОАО «Завод Микропровод», г. Подольск

E-mail: petrov@elti.tpu.ru

*При использовании рекомендаций по выбору калибров для эмалирования круглой проволоки установлено, что толщины слоев лака, наносимых по каждому проходу, могут увеличиваться от первого прохода к последнему, или, наоборот, убывать. Соответственно в первом случае степень структурирования изоляции провода будет ниже, чем во втором. Показана возможность расчета толщины наносимых слоев лака по каждому проходу, и при необходимости, корректировка маршрута калибров для обеспечения оптимальной степени запечки изоляции эмалированных проводов.*

**Ключевые слова:**

Эмалирование, лак, проволока, калибр.

**Key words:**

Enamellings, paint, wire gauge, caliber enameling.

Обмоточные провода применяются для изготовления обмоток электрических машин, аппаратов и приборов. Наиболее прогрессивной группой обмоточных проводов являются эмалированные провода. Эмалирование — это послойное нанесение жидкого лака на проволоку с последующей термообработкой ее в печи при температуре 500...600 °С, в результате которой образуется изоляционное покрытие. Качество образующегося изоляционного покрытия зависит от физико-химических свойств лака, от качества поверхности эмалируемой проволоки и от правильности режимов наложения лака на проволоку и последующей его тепловой обработки.

Наиболее распространенным способом эмалирования является эмалирование с помощью неразъемных калибров. Главным достоинством нанесения лака на провод с помощью калибров является возможность регулирования толщины наносимого слоя, что позволяет оптимизировать время испарения растворителя и время структурирования. Стабильность толщины изоляции провода является важнейшим фактором, определяющим уровень и однородность его электрических и механических параметров. В слоях одинаковой толщины степень завершенности химической реакции будет постоянной. Следовательно, многослойная изоляция эмалированного провода будет более однородной по своим свойствам. Поэтому правильный выбор технологических режимов эмалирования имеет исключительное большое значение для обеспечения высокого качества изоляции [1].

Следует также отметить, что технологическое оборудование для производства эмалированных проводов имеет сложную конструкцию и требует более точных расчетов режима эмалирования проволоки. Существовавшая ранее методика расчета маршрута калибров, разработанная в 1963 г. Е.Я. Шварцбургом, устарела, т. к. была использована для конических калибров, которые в настоящее время на практике почти не применяются.

Сейчас используются оптимальные калибры — с коническим входным отверстием и цилиндрическим формующим выходным отверстием. Условия течения жидкости в этих калибрах существенно отличаются от условий течения жидкости в конических калибрах.

**Принцип выбора калибров**

В настоящее время подбор маршрута калибров для эмалирования проволоки на горизонтальных и вертикальных станках производится, как правило, по рекомендациям фирм, производящих это оборудование. Эти рекомендации основаны на большом практическом опыте производства эмалированных проводов и могут быть использованы для вполне определенной группы лаков. Так, например, австрийская фирма, производящая станки типа MAG, рекомендует для полиэфирных и полиэфиримидных лаков устанавливать диаметр первого калибра больше диаметра проволоки на опытную величину  $a$ , которая в свою очередь зависит от диаметра проволоки  $d_0$  и класса изоляции провода. Для проволоки диаметром 0,15...0,7 мм и изоляции провода ПЭТ-2 величина  $a$  лежит в пределах 0,03...0,06 мм.

Исходя из диаметра сопла первого калибра  $d_{к1}$ , отверстия следующих сопел увеличиваются ступенями на 0,005 или 0,010 мм, пока сумма всех разностей  $\Sigma(d_{ki}-d_0)$ , умноженная на коэффициент, учитывающий вязкость лака,  $f$  и коэффициент уменьшения наносимого покрытия  $M$ , близко не даст требуемой толщины изоляции  $\Delta_T$

$$\Delta_T = Mf \sum_1^n (d_{ki} - d_0). \quad (*)$$

Если различие между требуемой толщиной изоляции и полученной при установленном числе проходов  $n$  окажется существенным, то рекомендуется пересмотреть шаг калибров в сторону его увеличения или уменьшения. Эмпирический коэффициент уменьшения толщины слоя лака  $M$  зависит

от типа калибра. Для конического он принят равным 0,95, а для калибра с цилиндрической формуемой частью – 0,7. Лаковый коэффициент  $f$  для полиэфирных и полиэфиримидных лаков с содержанием сухого остатка 17, 25 и 32 % принят равным 0,05, 0,066 и 0,1 соответственно.

В качестве примера в табл. 1 приведены рекомендованные фирмой MAG диаметры калибров  $d_k$  по проходам для эмалирования провода ПЭТ-2 с номинальным диаметром проволоки 0,6 мм.

Как следует из этих данных, опытная величина  $a$  принята равной 0,05 мм. Шаг калибров ( $d_k - d_0$ ), за исключением второго, принят равным 0,005 мм. Рассчитанная по уравнению (\*) толщина изоляции провода достигает значения близкого к необходимому ( $\Delta_T = 70$  мкм) за 11 проходов при использовании калибров с цилиндрической формуемой частью и сухом остатке лака 32 %.

$$\Delta_T = 0,7 \cdot 0,1 \cdot 875 = 68,95 \text{ мкм, где } \Sigma(d_k - d_0) = 875 \text{ мкм.}$$

Данная рекомендация значительно упрощает процесс подбора калибров по установленным на практическом опыте эмпирическим коэффициентам и, как показывает практика, позволяет получить изоляционное покрытие соответствующее всем требованиям технических условий на провод.

К недостаткам этой рекомендации следует отнести наличие эмпирических коэффициентов, зависящих от типа калибра, применяемого лака, диаметра провода и отсутствие возможности, позволяющей установить связь между диаметром калибра и толщиной наносимого слоя лака. В связи с указанным возникла необходимость разработки инженерной методики расчета маршрута калибров, которая бы позволила рассчитать толщины слоев лака, наносимых на каждом проходе. В этом случае появляется возможность корректировки маршрута калибров таким образом, чтобы обеспечить одинаковые условия структурирования изоляционного покрытия провода по всем проходам.

На кафедре электроизоляции и кабельной техники Томского политехнического университета была разработана данная методика расчета размеров калибров для производства эмалированных проводов промышленного применения с учетом указанных недостатков. Рассчитанные по предлагаемому методу калибры для эмалирования проволоки позволяют максимально оптимизировать технологический режим эмалирования без больших и сложных для обслуживающего персонала расчетов. Согласно маршруту калибров, предлагаемого фирмой MAG (\*) для эмалирования проволоки диаметром  $d_0 = 0,6$  мм (провод ПЭТ-2, табл. 1), по предложенной нами методике [2] был произведен расчет обобщенной величины сухого остатка лака, который составил  $P_{06} = 0,133$ .

Расчетное значение сухого остатка лака составляет  $P = 0,346$ , что хорошо согласуется с фактическим значением сухого остатка  $P = 0,30 \dots 0,36$  полиэфирного и полиэфиримидного лаков, применяемых для провода ПЭТ-2. При этом учтены коэффициенты  $P_1$  и  $P_2$ , характеризующие уменьшение

толщины лаковой пленки за счет вытяжки проволоки  $P \approx 0,02$  и уноса низкомолекулярных фракций лака при его термической обработке  $P_T \approx 0,06$ .

**Таблица 1.** Рекомендуемые диаметры калибров  $d_k$  (\*) и расчетные значения толщин жидкого и твердого слоев, наносимых за один проход,  $\delta_k$  и  $\delta_T$ , мкм

№ прохода	$d_k$	$d_k - d_0$	Расчетные данные	
			$\delta_k$	$\delta_T$
1	650	50	25	6,6
2	660	60	26	7,0
3	665	65	26	6,8
4	670	70	25	6,6
5	675	75	25	6,5
6	680	80	24	6,4
7	685	85	24	6,3
8	690	90	24	6,2
9	695	95	23	6,1
10	700	100	23	6,1
11	705	105	23	6,0
$\Sigma$	–	875	268	70,6

**Таблица 2.** Расчет маршрута калибров и толщины слоя лака  $\delta_k$ , мм, по методике [2, 3]

№ прохода	$d_k$	$d_k$ (округлен)	$\delta_k$
1	0,650	0,650	0,025
2	0,657	0,660	0,026
3	0,663	0,660	0,024
4	0,670	0,670	0,025
5	0,676	0,670	0,023
6	0,683	0,680	0,024
7	0,690	0,690	0,025
8	0,696	0,690	0,023
9	0,703	0,700	0,024
10	0,709	0,710	0,025
11	0,716	0,710	0,024

Диаметральная толщина лака, нанесенная на первом проходе, составляет

$$\delta_{1ж} = \frac{d_{1к} - d_0}{2[P_{06}(n-1) + 1]} = \frac{650 - 600}{2} = 25 \text{ мкм.}$$

Расчетные значения  $\delta_{1ж}$  по остальным проходам приведены в табл. 1.

Диаметральная толщина твердой эмали, наносимой на первом проходе, составляет

$$\Delta_{1Т} = \frac{d_{1к} - d_0}{\frac{1}{P_{06}} + (n-1)} = \frac{650 - 600}{\frac{1}{0,133}} = 6,6 \text{ мкм.}$$

Расчетные значения  $\delta_T$  по остальным проходам, а также диаметральная толщина изоляции  $\Sigma \delta_T$  по сумме всех проходов приведены в табл. 1.

Как показали наши расчеты, при использовании критерия (\*) при числе проходов  $n = 11$  и рекомендованном маршруте калибров толщина лака, наносимая на каждом из проходов, остается практически постоянной и лежит в пределах от 23 до 26 мкм, что находится в хорошем соответствии с расчетом по методике [2, 3], табл. 2.

В настоящее время нет работ по выбору оптимальных маршрутов калибров, которые обеспечивали бы при заданной скорости и температуре эмалирования высокие значения всех физико-механических свойств изоляции провода. Считается, что основным условием достаточно высокого качества изоляции эмалированного провода является обеспечение постоянства толщины слоев лака, наносимых на каждом проходе [1]. Действительно, в этом случае каждый из наносимых слоев лака, проходя через печь, будет иметь одну и ту же степень структурирования, что, казалось бы, гарантирует высокое качество покрытия. Если учитывать, что последний слой лака проходит термообработку только один раз, а внутренний (первый слой) – многократно (10 и более), то можно считать, что внутренние слои при последующих проходах подвергаются дополнительному структурированию, что приводит к увеличению неоднородности свойств покрытия по толщине [4].

Чтобы добиться одинаковой степени структурирования по всем проходам, необходимо внешние слои лака наносить меньшей толщины, что приведет к увеличению скорости их нагрева и уменьшению затраты времени на пленкообразование. Однако у специалистов-практиков нет единой точки зрения на эту проблему [5]. Это обусловлено в первую очередь отсутствием экспериментальных работ в этом направлении, а также отсутствием достаточно точной инженерной методики теплового расчета процесса эмалирования проволоки.

#### Расчет маршрута калибров

В большинстве случаев на отечественных заводах выбор технологических режимов при изготовлении эмалированных проводов, как отмечалось выше, производится опытным путем, исходя из многолетней практики обслуживания эмаль-агрегатов. Как показывает практика, подбор маршрутов калибров для эмалирования не всегда дает оптимальный результат.

В связи с этим, на разных заводах при изготовлении одного и того же типоразмера провода применяемые маршруты калибров не совпадают при одинаковом числе проходов. Провода получают разного качества и с различной по цвету эмалевой пленкой [2]. Так, например, на ведущем предприятии кабельно-проводниковой отрасли ОАО «Завод Микропровод» при изготовлении провода ПЭТ-155 диаметром  $d_0=1,0$  мм с диаметральной толщиной изоляции  $\Delta_T=0,085$  мм; при числе проходов  $n=18$  установлен маршрут калибров ( $d_0$ , эксп.), приведенный в табл. 3. Для этого же провода даны рассчитанные по методике [2, 3] размеры калибров ( $d_k$ , расч.).

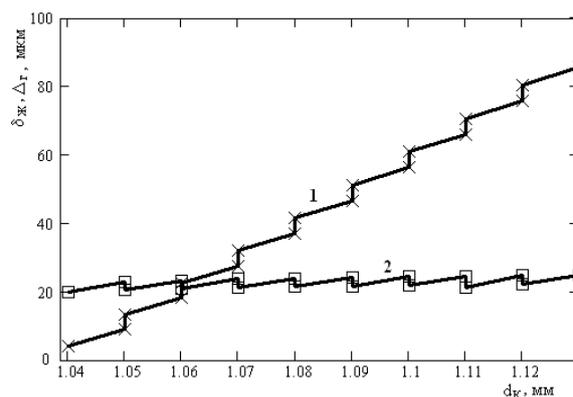
Как следует из табл. 3, шаг маршрута калибров, применяемых на практике, равен 10 мкм, что обусловлено использованием стандартных размеров калибров. В заводской практике нет возможности подбирать размеры калибров в строгом соответствии с расчетом. В таком случае округляют рас-

четные значения калибров до ближайших стандартных размеров с шагом 0,005...0,010 мм. Такая корректировка маршрута калибров приводит к незначительному отклонению толщины покрытия за один проход от его расчетного значения. Из табл. 3 видно, что значения рассчитанных диаметров калибров практически совпадают с размерами калибров, применяемых на практике.

**Таблица 3.** Эмалирование провода марки ПТ-155 диаметром 1,0 мм. Расчетные ( $d_k$ , расч.) и экспериментальные ( $d_k$ , эксп.) диаметры калибров, мм

№ прохода	$d_k$ , расч.	$d_k$ , эксп.
1	1,045	1,04
2	1,049	1,05
3	1,054	1,06
4	1,059	1,06
5	1,064	1,06
6	1,069	1,07
7	1,073	1,07
8	1,078	1,08
9	1,083	1,08
10	1,087	1,09
11	1,092	1,09
12	1,097	1,10
13	1,101	1,10
14	1,106	1,11
15	1,111	1,11
16	1,116	1,12
17	1,120	1,12
18	1,125	1,13

Толщина жидкого слоя лака, наносимого на каждом из проходов, постоянна и для рассчитанного маршрута калибров составляет 22,5 мкм.



**Рис. 1.** Зависимость общей толщины твердой эмали  $\Delta_T$ (1) и толщины слоя лака  $\delta_{жк}$ , наносимого на каждом проходе (2) от диаметра установленных калибров

Как следует из рис. 1, толщина жидкого слоя лака при установке расчетных диаметров калибров после их округления до стандартных размеров (линия 2) на всем маршруте изменяется в пределах от 20 до 24,8 мкм, и ее среднее значение совпадает с расчетной величиной. Таким образом, постоянство наносимой толщины жидкого слоя лака созда-

ет одинаковые условия структурирования по всем проходам. Оно достигается путем установки сдвоенных, а то и строенных калибров одинакового диаметра. Такой подход к выбору маршрута калибров был использован для всех типоразмеров проводов в ОАО «Завод Микропровод». Толщины твердых слоев эмали по всем проходам (линия 1) для расчетных и заводских калибров практически полностью совпадают.

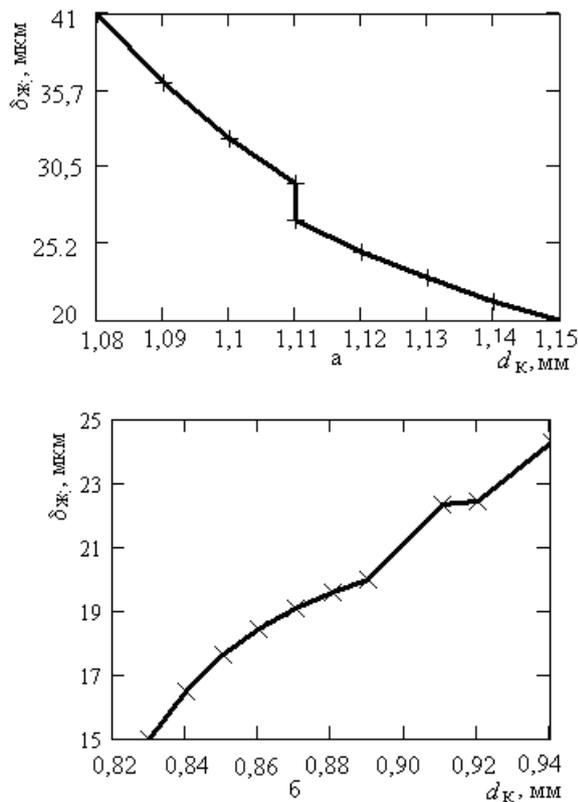


Рис. 2. Распределение толщины наносимого слоя лака по проходам при значении параметра а: а) завышенное; б) заниженное

Пользуясь рекомендациями фирм, производящих эмаль-станки, заводы устанавливают разные маршруты калибров. В качестве примера на рис. 3 представлены расчетные значения толщины слоев лака, наносимого по проходам при эмалировании круглой проволоки диаметром 0,8 и 1,1 мм в ЗАО «Сибкабель», г. Томск. Отклонения при выборе калибров от рекомендаций приводят либо к снижению жидкого слоя лака  $\delta_{ж}$  по проходам рис. 3, а, либо к его возрастанию рис. 3, б. Так, например, на рис. 3, а, при эмалировании проволоки диаме-

тром 1,0 мм, снижение  $\delta_{ж}$  в два раза (от 0,041 до 0,020 мм) по слоям эмалирования обусловлено выбором завышенного значения эмпирического параметра,  $a=0,08$ . На рис. 3, б, наоборот, увеличение толщины лаковой пленки от первого прохода к последнему, при эмалировании проволоки диаметром 0,80 мм составляет от 0,015 до 0,024 мм и обусловлено выбором заниженного значения эмпирического параметра,  $a=0,03$ .

Хотя среднее значение толщины лакового слоя, наносимого по проходам, и общая толщина изоляционного покрытия провода соответствуют расчетным данным (техническим условиям на провод), условия структурирования основы лака у них существенно различаются. Изоляция провода диаметром 0,8 мм будет обладать заниженными физико-механическими свойствами по сравнению с проводом диаметром 1 мм вследствие меньшей степени сшивки макромолекул. Неоднородность свойств изоляции этого провода будет так же более высокой. Для получения эмалированного провода необходимого качества приходится понижать скорость эмалирования или повышать температуру в эмальпечи, что приводит к дополнительным затратам энергии.

#### Выводы

1. Установлено, что рекомендуемый фирмами, производящими эмаль-агрегаты, способ подбора маршрута калибров не гарантирует постоянство толщины наносимого покрытия по слоям эмалирования, поскольку ближайший стандартный размер калибра может значительно отличаться от рекомендуемого. Кроме того, эти рекомендации в принципе не позволяют определить толщину наносимого покрытия за один проход.
2. Установлено, что толщины слоев лака, наносимых по каждому проходу, могут увеличиваться от первого прохода к последнему, или, наоборот, убывать. Маршрут калибров, позволяющий наносить слои лака с постоянно убывающей толщиной является предпочтительным, поскольку тонкие слои будут быстрее и равномернее прогреваться, что способствует получению более качественной по степени запечки изоляции.
3. Показана возможность расчета толщины наносимых слоев лака по каждому проходу и, при необходимости, корректировка маршрута с использованием сдвоенных калибров для обеспечения оптимальной степени запечки изоляции эмалированных проводов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пешков И.Б. Обмоточные провода. – М.: Энергоатомиздат, 1995 – 416 с.
2. Петров А.В. Основные положения к расчету маршрута калибров для эмалирования проволоки // Кабели и провода. – 2009. – № 6. – С. 12–14.
3. Петров А.В., Дзюбань Г.Н., Елисеева О.Н. Расчет диаметра калибров для эмалирования проволоки // Кабель-News. – 2009. – № 8. – С. 57–60.

4. Петров А.В., Чуринова А.С. Исследование температурной зависимости тангенса дельта проводов по слоям эмалирования // Электромеханические преобразователи энергии: Матер. Междунар. научно-техн. конф. – г. Томск, 17–19.10.2007. – Томск, ТПУ, 2007. – С. 363–365.
5. Зеленецкий Ю.А. Точка зрения специалиста-практика // Кабели и провода. – 2009. – № 6. – С. 14.

Поступила 14.07.2010 г.