

ТЕРМООБРАБОТКА ПРОВОДОВ С ПЛЕНОЧНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Г.И. Мещанов, канд. техн. наук,
генеральный директор ОАО «ВНИИКП»

Известно [1], что для обеспечения монолитности изоляции из фторопластовых или полиимидно-фторопластовых пленок необходимо обеспечить спекание (сваривание) этих пленок между собой при температурах в диапазоне 320–360°C. При этом необходимым условием хорошего качества спекания является необходимое давление на пленки и достаточное время спекания. Для обеспечения требуемого давления обмотка пленками должна осуществляться с максимально допустимым натяжением, а при изготовлении прямоугольных проводов из-за известного эффекта припухлости изоляции (бочкообразность) на большей стороне обязательно применение обжимных роликов после выхода провода из печи.

В настоящее время все современные машины для изготовления обмоточных проводов со спекаемой пленочной изоляцией совмещают процесс обмотки и термообработки. В таких машинах процессом, лимитирующим производительность (скорость), является процесс обмотки. С целью же достижения максимальной производительности процесса термообработки и обеспечения условий спекания изоляции необходимо правильное понимание процессов нагрева провода и количественная оценка режимов нагрева с учетом различных факторов. Это особенно важно для проводов крупных сечений, например, таких как круглые провода для погружных электродвигателей в диапазоне сечений от 3 до 15 мм² и прямоугольные провода для тяговых и др. электродвигателей в диапазоне сечений от 5 до 35 мм². При производстве таких проводов лимитирующим может оказаться процесс термообработки.

Как известно, нагрев проводов сечением свыше 3 мм² происходит достаточно медленно. В связи с этим и с целью обеспечения приемлемой технологической скорости термообработки приходится значительно увеличивать длину печи, что не всегда возможно и экономично. Для уменьшения длины печи возможно применение принудительной циркуляции горячего воздуха в камере печи, как это делается в печах для эмалирования проволоки. За счет этого обеспечивается более интенсивный теплообмен между воздухом и проводом, что ускоряет его нагрев.

Ускорение процесса нагревания провода может достигаться также за счет использования высокочастотного нагрева [2]. В этом случае процесс термообработки ведется сначала в высокочастотном индукторе длиной как правило до 1 м и затем в обычной печи сопротивления длиной 4 м, служащей для обеспечения дополнительного нагрева до

температуры 350°C и поддержания температуры провода в диапазоне 320–350°C в течение времени, необходимого для спекания пленок. В настоящей статье представлен расчет нагрева провода в обычной печи со свободной конвекцией при теплообмене и в печи с принудительной циркуляцией воздуха. В последующей публикации будет рассмотрен расчет для комбинированной установки с применением высокочастотного метода нагревания и дана сравнительная оценка эффективности этих методов.

В [3] рассмотрена методика расчета нагрева проводов в печах. Время нагрева провода можно определить по формуле:

$$t = \frac{1}{\mu} \ln \frac{T_T - T_H}{T_T - T_M}, \quad (1)$$

в которой T_T – температура в печи, измеренная термометром, T_H и T_M – начальная и максимальная температура провода. Безусловно T_T зависит от температуры стенки печи T_C и температуры воздуха T_B . Но так как скорость движения воздуха в горизонтальной печи мала, а коэффициент черноты стенки и термометра не сильно отличается, то можно принять $T_C = T_B = T_T$. Для расчетов принято $T_T = 400^\circ\text{C}$; $T_H = 20^\circ\text{C}$.

Коэффициент $\mu(1/\text{с})$ определяется по формуле:

$$\mu = \frac{\alpha p}{K_n C_M Q_M}, \quad \text{где} \quad (2)$$

α – коэффициент теплопередачи для провода, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$; C_M – теплоемкость единицы объема металла, $\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C}}$; p – наружный периметр по изоляции

провода, м; Q_M – площадь сечения по металлу, м²; K_n – коэффициент увеличения теплоемкости провода за счет изоляции, который можно принять для нашего случая при толщине изоляции 0,15 мм в среднем $K_n = 1,05$.

Для крупных размеров проводов на нагрев существенно влияют как конвективный теплообмен с воздухом, так и теплообмен излучением со стенками печи. В этом случае $\alpha = \alpha_n + \alpha_k$, где α_n – коэффициент теплопередачи излучением; α_k – коэффициент конвективной теплопередачи. Коэффициенты α_n и α_k определяются по известным формулам [4].

$$\alpha_n = \varphi_n \varepsilon_T \cdot C_o \left[\left(\frac{T_c}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_n}{100} \right)^4 \right] / T_c - T_n, \quad (3)$$

Таблица 1

Диаметр провода d, мм		2,0	2,5	5,0	8,0
α , Вт/м ² с	печь 1	66,4	61,6	52,0	44,5
	печь 2	118,0	111,0	87,0	75,0
μ , 1/с	печь 1	0,0352	0,0262	0,011	0,0059
	печь 2	0,0625	0,048	0,0185	0,01
Время нагрева t от 20 до 350°C, с	печь 1	56,6	76,3	191,0	339,0
	печь 2	32,0	41,6	108,0	200,0
Скорость провода V, м/мин	печь 1	5,3	3,94	1,57	0,88
	печь 2	9,35	7,2	2,78	1,5
Время нагрева до 320°C, с	печь 1	44,1	59,5	142	264
	печь 2	25,0	32,4	84,0	156,0
Время нахождения провода в печи при t 320–350°C, с	печь 1	12,5	16,8	34,0	75,0
	печь 2	7,0	9,2	24,0	44,0
Время нахождения провода при t 320–350°C с учетом охлаждения после выхода из печи, с	печь 1	16,1	21,7	46,8	99,0
	печь 2	10,6	14,1	36,8	68,0

где ε_T – коэффициент черноты поверхности, φ_n – угловой коэффициент облучения, C_o – коэффициент, характеризующий излучение абсолютно черного тела $C_o = 5,7$; $\varphi_n \approx 0,9$. Для полимеров $\varepsilon_T \approx 0,8$.

$$\alpha_k = Nu\lambda/d_1 \quad (4)$$

В формуле (4) Nu – критерий Нуссельта; λ – теплопроводность воздуха при средней температуре $T_{cp} = (T_b + T_n)/2$ Вт/м²°C; d_1 – определяющий размер в метрах. Для круглых проводов это диаметр провода, а для прямоугольных проводов – размер широкой стороны.

Критерий Нуссельта при свободной конвекции для проводов с $d_1 = 1 - 8$ мм определяется по критериальному уравнению $Nu = 1,18 (GrPr)^{0,125}$, где

$$Gr = \frac{9,81 \cdot d_1^3 \varrho_n}{v^2 T_{cp}} \quad - \text{критерий Грассгофа, } Pr = 0,7 - \text{критерий Прандля, } \varrho_n = T_b - T_n; v - \text{кинематическая вязкость воздуха.}$$

Для условий нагрева проводов с полиимидно-фторопластовой изоляцией в печи со свободной конвекцией получим приближенную формулу:

$$\alpha_k = 28 \varrho_n^{0,125} / d_1^{0,625} \quad (5)$$

в котором d_1 – выражается в мм.

В случае нагрева провода в печи с принудительной циркуляцией воздуха со скоростью v_b (м/с) число Нуссельта в формуле (4) определяется в соответствии с [4] как

$$Nu = (0,43 + 0,5 Pr^{0,3} Re^{0,5}) K\varphi K_T \quad (6)$$

где $K\varphi$ – коэффициент, зависящий от угла между направлением движения воздуха и осью провода. Для $\varphi = 0$; $K\varphi = 0,5$; K_T – коэффициент турбулентности потока воздуха; Re – критерий Рейнольдса.

$$Re = v_b d_1 / \nu \quad (7)$$

Сравнительные результаты расчета процесса нагрева провода по указанным выше формулам в печи длиной 5 м со свободной конвекцией (печь 1) и в печи с принудительной циркуляцией воздуха со скоростью $v_b = 4$ м/с ($K_T \approx 1,4$) (печь 2) представлены в табл. 1.

В последней строчке табл. 1 представлено общее время нахождения провода при температуре в диапазоне от 320 до 350°C с учетом процесса охлаждения провода после выхода из печи, когда еще продолжается спекание изоляционных пленок. Время охлаждения определяется исходя из формулы (1) для температуры охлаждения провода T_n .

$$T_n = (T_m - T_n) \lambda^{-\mu t} \quad (8)$$

Расчетные значения параметров охлаждения при $T_m = 350^\circ\text{C}$; $T_n = 320^\circ\text{C}$; $T_n = 20^\circ\text{C}$ приведены в табл. 2.

На основании анализа результатов табл. 1 можно сделать следующие выводы. При использовании печи со свободной конвекцией скорость нагрева проводов диаметром свыше 2,0 мм значительно снижается и процесс термообработки в этом случае становится лимитирующим фактором при производстве проводов, поскольку процесс высококачественной обмотки можно вести при скоростях 5–7 м/мин. и даже выше. Применение принудительной циркуляции воздуха в печи позволяет увеличить скорость нагрева провода в 1,7–1,8 раза и решить проблему производительности и оптимизации процесса обмотки и термообработки, хотя конструкция такой печи значительно усложняется. Однако как в первом, так и во втором случае следует обратить внимание на неэффективное использование печи для процесса спекания пленок. Как показыва-

Таблица 2

d, мм	2,0	2,5	5,0	8,0
α , Вт/м ² с	53,0	48,2	36,9	31,5
μ , 1/с	0,028	0,0203	0,00781	0,00416
Время охлаждения t, от 350 до 320°C, с	3,6	4,9	12,8	24,0

Таблица 3

ют приведенные расчеты только примерно $1/5$ часть длины печи используется для нахождения провода в зоне оптимальных температур для спекания изоляции. При этом прямое увеличение скорости процесса нагрева в печи с принудительной циркуляцией резко уменьшает время нахождения провода в этой оптимальной зоне, и оно может оказаться недостаточным для обеспечения необходимого качества спекания. В связи с этим более надежным процессом термообработки в отношении качества спекания и эффективности использования печи сопротивления является комбинированный нагрев с применением высокочастотного нагрева в первой зоне. В этом случае провод в печь сопротивления поступает уже нагретым до температуры T_n . Если задаться определенной скоростью процесса термообработки с обеспечением нагрева до конечной температуры T_m , то можно определить необходимую в этом случае начальную температуру провода T_n при входе в печь. Из (1) следует, что начальная температура должна быть

$$T_n = T_m \lambda^{ue t} - T_t (e^{ue t} - 1) \quad (9)$$

В качестве примера в табл. 3 представлены рассчитанные по (9) значения T_n при различных скоростях термообработки V для проводов диаметром 2,0 и 2,5 мм. Расчет выполнен для печи длиной 4 м со свободной конвекцией при $T_t = 400^\circ\text{C}$; $T_n = 350^\circ\text{C}$.

Данные табл. 3 показывают температуру, которую должен обеспечить высокочастотный индуктор на входе в печь сопротивления, а также позволяют рассчитывать необходимые параметры индуктора. С использованием данных табл. 3, был проведен расчет параметров нагрева провода

$d = 2 \text{ мм}$	$V \frac{\text{м}}{\text{мин}}$	5,5	6,0	6,5	7,0
	$T_n \text{ }^\circ\text{C}$	168	196	217	233
$d = 2,5 \text{ мм}$	$V \frac{\text{м}}{\text{мин}}$	4	4,5	5,0	5,5
	$T_n \text{ }^\circ\text{C}$	160	198	224	243

в печи сопротивления аналогично тому, как это представлено в табл. 1. Анализ полученных данных показывает, что время пребывания провода в печи при температурах $320\text{--}350^\circ\text{C}$ в этом случае возрастает более чем в 3 раза, что повышает эффективность использования пространства печи и гарантирует качество спекания изоляции при высоких скоростях ведения процесса термообработки.

ЛИТЕРАТУРА



1. Мещанов Г.И. Обмоточные провода с монолитной изоляцией из ленточного фторопласта – 4 // Электротехническая промышленность / Серия Кабельная техника. 1966. Вып. 39.
2. Мещанов Г.И. Технология термообработки обмоточных проводов с пленочной изоляцией нагревом токами высокой частоты // Электротехника. 1983. № 10.
3. Холодный С.Д. Технологическая термообработка изоляции кабелей и проводов. М.: МЭИ, 1994.
4. Теплотехнический справочник. Том 2 / Под редакцией В.Н. Юпенева и П.Д. Лебедева. М.: Энергия, 1976.

Wire & Plastic Machinery Corp.

**КРУПНЕЙШИЙ В МИРЕ СКЛАД ОБОРУДОВАНИЯ
ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОЕ БЫВШЕЕ В УПОТРЕБЛЕНИИ
ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ КАБЕЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Наше предложение включает все типы оборудования для следующих категорий:

- Волоочильные машины
- Крутильные машины для неизолированных проводников
- Крутильные машины для изолированных кабелей
- Экструзионные линии для пластических и резиновых материалов
- Испытательное оборудование
- Бобины и барабаны
- Оплеточные машины

Наши специалисты могут оснастить предлагаемые машины новым электрооборудованием в соответствии с вашими местными требованиями.



Оборудование в постоянном предложении

- Промышленные, контрольные, силовые кабели
- Оборудование для производства LAN-кабелей
- Оборудование для производства медных телекоммуникационных кабелей.
- Оборудование для производства оптических кабелей для локальных сетей (LAN)
- Оборудование для производства оптических телекоммуникационных кабелей
- Для производства подводных кабелей
- Для производства низковольтных кабелей

Наше оборудование размещается на трех территориях общей площадью 90 000 кв. метров

- Бристоль, Коннектикут, США
- Нью-Хейвен, Коннектикут, США
- Уейдесборо, Сев. Каролина, США

Wire & Plastic Machinery Corp. 100 Franklin Street Bristol, CT 06010 USA
Phone (860) 583-4646 Fax (860) 589-5707; E-mail: sales@wpmcorp.com www.wpmcorp.com
Ваир&Пластик Машинери Корп. 100 Франклин стрит, Бристоль, Коннектикут, США