



# УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ОБМОТОЧНЫХ ПРОВОДОВ С ПЛЁНОЧНОЙ ПОЛИИМИДНО- ФТОРОПЛАСТОВОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

**B.E. Vasiliev**, Deputy General Director of JSCL. "Thermoprovod"

**Б.Е. Васильев**, заместитель генерального  
директора ЗАО «Термопровод»

**Аннотация.** На основании анализа компонентов технологии производства обмоточных проводов с полиимидно-фторопластовой изоляцией предложен ряд технологических усовершенствований и расчётов, позволяющих оптимизировать режимы технологии производства. Определены ключевые детали технологии с описанием их влияния на качественные характеристики проводов и физико-химические процессы, происходящие при производстве проводов.

**Ключевые слова:** полиимидно-фторопластовая (ПМФ) плёнка, технология переработки ПМФ-плёнки, технология изготовления обмоточных проводов с плёночной изоляцией, расчёт режима обмотки.

**Abstract.** A qualitative model for the calculation of optimal conditions of polyimide-fluoroplastic film insulated winding wire production was developed based on the analysis of the technology components of this complicated process. The model can be used to calculate the key technology details with the description of their impact on the qualitative characteristics of wires and physical and chemical processes taking place during wire production.

**Key words:** polyimide-fluoroplastic film (PFF), PFF-film processing technology, film-insulated winding wire manufacturing technology, calculation of winding conditions.

*Материал поступил в редакцию 18.03.2020*

*E-mail: vbe@termoprovod.ru*

Полиимидно-фторопластовая плёночная изоляция (ПМФ-плёнка) в кабельной промышленности применяется в основном в качестве многослойной изоляции медных обмоточных проводов круглого и прямоугольного сечения. Данный тип проводов используется, как правило, в качестве обмоток электродвигателей и трансформаторов. Эти провода используются в условиях повышенных температур. К ним предъявляются высокие требования по химической стойкости и электрическим параметрам изоляции.

Технология производства проводов с плёночной полиимидно-фторопластовой изоляцией осуществляется в три стадии:

1. Подготовка токопроводящей жилы для наложения изоляции.

2. Наложение изоляции методом обмотки.

3. Термообработка наложенной изоляции с целью спекания.

В настоящей статье предпринята попытка анализа влияния технологического процесса на каждой стадии на качественные характеристики провода.

## ПОДГОТОВКА ТОКОПРОВОДЯЩЕЙ ЖИЛЫ ДЛЯ НАЛОЖЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ

Подготовка токопроводящей жилы (ТПЖ) начинается со стабилизации путём её пребывания в климатических условиях цеха. Стабилизация необходима для удаления влаги с поверхности ТПЖ, так как влага может появиться в процессе изготовления, хранения и транс-

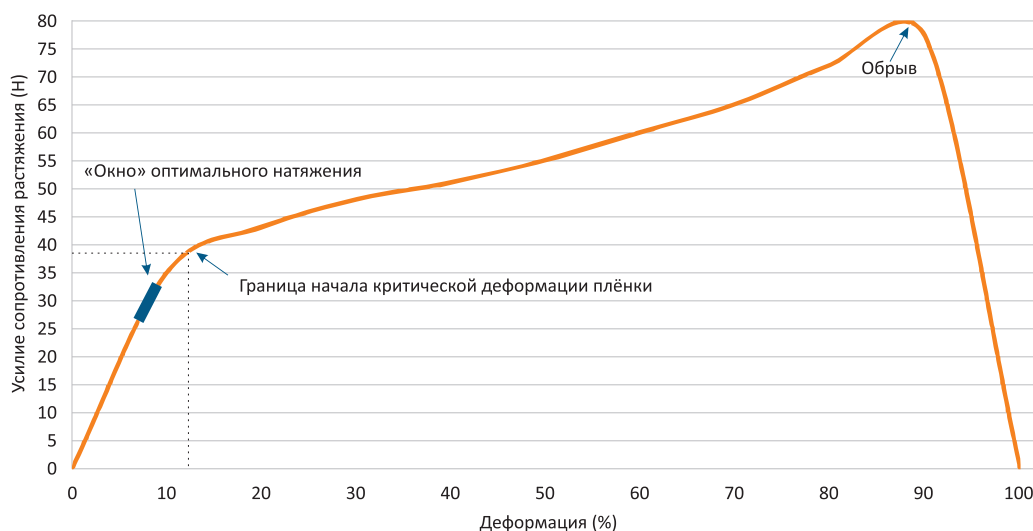


Рис. 1. Деформация ПМФ-плёнки шириной 12,5 мм и толщиной 40 мк с точкой возникновения необратимой деформации в зависимости от усилия сопротивления растяжению

портировки жилы. Наличие влаги на поверхности ТПЖ приводит к ухудшению адгезии ПМФ-плёнки к жиле. Далее механическая обработка ТПЖ – исправление кривизны жилы и механическая очистка поверхности. Важное значение имеет предварительный подогрев жилы. Предварительный подогрев может быть произведён двумя способами. При первом способе жила подогревается до температуры выше 70 °С. Это позволяет удалить влагу с поверхности жилы и не проводить стабилизацию в климатических условиях цеха. Кроме того, улучшаются адгезионные свойства ТПЖ. Этот способ заключается в предварительном нагреве жилы до температуры 300–350 °С. При такой температуре на поверхности жилы идёт рост оксидных плёнок. Это приводит к активации поверхности жилы и положительно влияет на адгезию ПМФ-плёнки к жиле. Одновременно происходит удаление с поверхности влаги и разложение любых смазочных и жировых загрязнений (их сгорании), оставшихся после волочения жилы.

#### НАЛОЖЕНИЕ ИЗОЛЯЦИИ МЕТОДОМ ОБМОТКИ

Процесс наложения ПМФ-плёнки на жилу включает сход плёнки от бобины до жилы и обеспечение оптимального натяжения плёнки при обмотке жилы.

В процессе схода плёнки ключевыми параметрами являются:

- равномерность схода плёнки (отсутствие рывков);
- плавность изменения направлений движения плёнки по тракту (отсутствие деформаций, перегибов и скручивания);
- равномерность величины натяжения плёнки в поперечном направлении относительно направления её схода во всех точках тракта.

Надо учитывать, что для достижения описанных выше процессов необходима высокая точность поддер-

жания оборотов обмотчика (подкатушечника и корзины), усилия натяжителя плёнки и высокая точность синхронизации узлов линии. Точность позволит сохранять стабильный угол наложения плёнки на жилу. При расчёте технологического режима обмотки необходимо в первую очередь отталкиваться от угла наложения и стремиться выдержать его в допустимых пределах (40–60 градусов). Необходимое для установки и поддержания на линии натяжение должно быть не более усилия деформации ПМФ-плёнки (рис. 1).

Определяется данный параметр в рамках входного контроля при испытании ПМФ-плёнки. После проведения данного испытания в сопроводительном производственном задании необходимо указывать максимальное допустимое усилие натяжения плёнки, на которое смогут ориентироваться технолог и оператор при корректировке режима в случае необходимости.

Стабильный процесс поддержания натяжения ПМФ-плёнки позволяет получить одинаковое усилие прижатия слоёв изоляции между собой и к жиле по всей длине провода, что гарантирует герметичность изоляции, и избежать необратимой деформации плёнки, что предотвращает снижение пробивного напряжения и механической прочности.

Расчёты режимов обмотки обычно делаются на основе плоской двумерной модели, основанной на теореме о подобии треугольников. В конечном счёте был получен технологический режим.

Заданные параметры для расчёта:

- $d$  – диаметр жилы, мм;
- $L_1, L_2 \dots$  – ширина плёнок в каждом лентообмотчике, мм;
- $H_1, H_2 \dots$  – толщина плёнок в каждом лентообмотчике, мм;
- $\alpha_1, \alpha_2 \dots$  – острый угол между жилой и накладываемой ПМФ-плёнкой в продольном направлении;
- $V$  – линейная скорость движения ТПЖ.

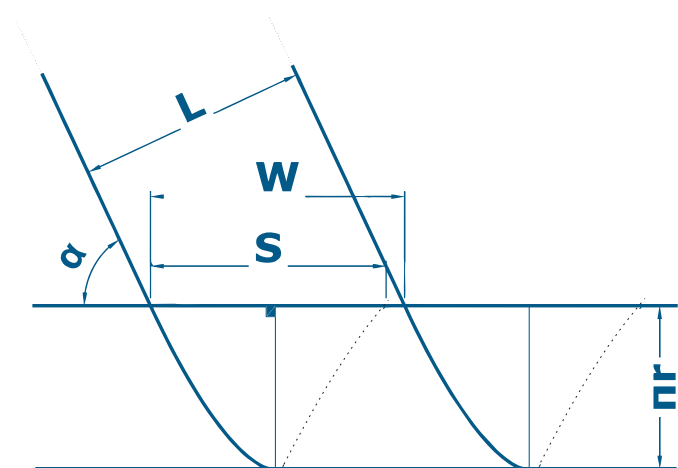


Рис. 2. Схема наложения ПМФ-плёнки на ТПЖ и ключевые параметры для расчёта режима обмотки

Расчёт технологического режима обмотки необходимо начать с выбора диаметра ТПЖ. Затем нужно выбрать соответствующую данному диаметру ТПЖ толщину и ширину ПМФ-плёнки.

На рис. 2 схематически показан принцип получения исходных параметров для расчёта. В большинстве центрошпульных лентообмотчиков ПМФ-плёнка сходит не напрямую на жилу, а через направляющее устройство – ниппель. От него зависит фактически получаемый угол наложения и увеличение натяжения ПМФ-плёнки из-за создаваемой им в поперечном направлении движения ПМФ-плёнки силы трения скольжения. Ниппель позволяет выровнять натяжение в поперечном сечении. Это воздействие не было учтено в предлагаемом расчёте ввиду возникающего от него неоправданного усложнения модели.

Поскольку для равномерного распределения натяжения в поперечном относительно тракта схода ПМФ-плёнки направлении необходимо выбирать средние значения угла наложения, то исходя из того, что угол может теоретически начинаться от 1 градуса (сверхбольшое недокрытие) и заканчиваться 90 градусами (работа лентообмотчика на одном месте), то средним значением будет 45 градусов, его необходимо всегда выбирать в начале расчёта технологического режима.

На основании этих данных были рассчитаны два ключевых параметра:

$W$  – ширина ПМФ-плёнки в продольном направлении относительно жилы, мм:

$$W = \frac{L}{\sin \alpha}$$

$S$  – шаг обмотки за один оборот, мм/об:

$$S = \pi \cdot d \cdot \cot \alpha$$

В зависимости от типа линии задание требуемого перекрытия может происходить тремя способами:

самого перекрытия  $X$ , оборотами лентообмотчика  $R$ , шагом перекрытия  $S$ .

$X$  – перекрытие, %:

$$X = \frac{W - S}{W}$$

$R$  – частота оборотов лентообмотчика, об/мин:

$$R = \frac{v \cdot 1000}{S}$$

Только один параметр  $R$  опирается на заданную во вводных данных необходимую скорость линии поскольку является непосредственным параметром работы линии. Остальные два (перекрытие  $X$  и шаг обмотки  $S$ ) являются косвенными, и программное обеспечение линии само пересчитывает эти параметры в требуемые обороты лентообмотчика.

Поскольку опорным показателем для корректировки вводных данных является расчётное перекрытие  $X$ , то в случае несоответствия расчётных значений требуемым корректируются два параметра: угол наложения и ширина ПМФ-плёнки. Приоритетным является корректировка ширины ПМФ-плёнки, так как не затрагивается оптимальное значение угла наложения и, следовательно, не будет изменяться поперечное распределение натяжения по ширине ПМФ-плёнки. Увеличением расчётной ширины ПМФ-плёнки увеличивается перекрытие до нужного значения. Если нет возможности достаточного регулирования ширины ПМФ-плёнки (при малой номенклатуре ширин ПМФ-плёнки) допускается корректировка угла наложения в небольшом диапазоне.

При увеличении значения угла наложения увеличивается и перекрытие. Диапазон корректировки угла ограничен характеристиками самой ПМФ-плёнки, а именно усилием растяжения, при котором начинается необратимая деформация ПМФ-плёнки.

При изменении угла наложения сторона ПМФ-плёнки, которая находится у более острого угла ( $\alpha$  или  $\beta$ , рис. 3) обладает меньшим натяжением чем другая сторона. При большом изменении угла относительно 45 градусов придётся повышать общее натяжение для достижения достаточного усилия на стороне с более слабым натяжением. На другой стороне возникнет усилие, которое будет деформировать ПМФ-плёнку. Исходя из производственного опыта допустимый диапазон регулирования угла для полиимидно-фторопластовых плёнок лежит в пределах  $45 \pm 10$  градусов. При остальных углах наложения не будет достигаться необходимого усилия прижатия плёнок при обмотке или будет происходить деформация плёнок.

На рис. 3 показаны углы наложения ПМФ-плёнки  $\alpha$  и  $\beta$  между плёнкой и проводником и между плёнкой и поперечной осью. Эти углы определяются соотноше-

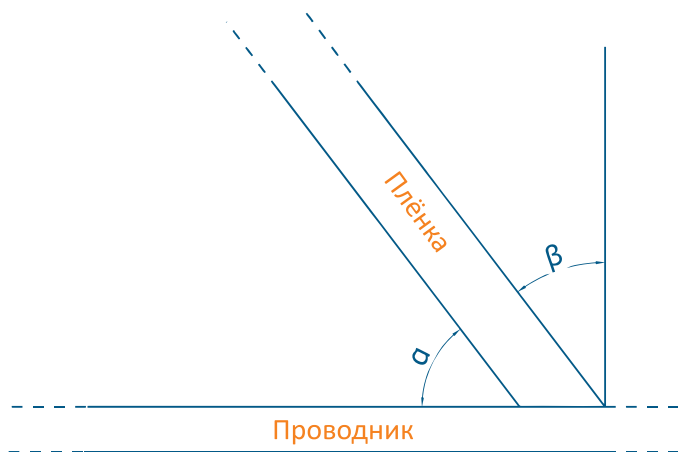


Рис. 3. Углы  $\alpha$  между ТПЖ и ПМФ-плёнкой и  $\beta$  между поперечной осью относительно ТПЖ и ПМФ-плёнкой

нием между линейной скоростью и оборотами обмотчика. Корректировка угла наложения в расчёте приведёт к изменению оборотов лентообмотчика.

В расчёте для каждого лентообмотчика было внесено количество слоёв изоляции на одну сторону  $Y$ .

$$Y = \frac{1}{1 - X}$$

Это позволяет определить количество слоёв изоляции на сторону для последующего определения размеров провода после обмотки в конкретном лентообмотчике. Количество слоёв изоляции на сторону от перекрытия растёт нелинейно. Ниже приведено количество слоёв изоляции для диапазона перекрытий на одну сторону провода:

- 1 слой – 0–50 %,
- 2 слоя – 50,0–66,6 %,
- 3 слоя – 66,6–75,0 %,
- 4 слоя – 75–80 %,
- 5 слоёв – 80,00–83,33 %,
- 6 слоёв – 83,33–85,71 % и т.д.

По результатам расчёта этой модели, кроме того, можно сделать вывод о некоторых характеристиках провода. Например, о величине пробивного напряжения, которая будет зависеть от количества слоёв изоляции и пробивного напряжения ПМФ-плёнки. Расчётная величина будет иметь невысокую погрешность относительно действительных полученных после производства и испытания провода значений. Так же можно заранее рассчитать геометрические размеры провода.

#### ТЕРМООБРАБОТКА НАЛОЖЕННОЙ ИЗОЛЯЦИИ С ЦЕЛЬЮ СПЕКАНИЯ

После обмотки жилы ПМФ-плёнкой производят термическую обработку изоляции с целью спекания её слоёв в печах различного типа. Этот процесс может быть совмещённым с обмоткой, а может производиться

отдельно. Совмещённая технология предпочтительнее, так как это исключает возникновение дефектов, связанных с человеческим фактором и усложнением технологического процесса.

Термообработка может происходить с использованием печей различного типа действия (индукционных, резистивных, инфракрасных, соляных) и производительности. Принципиальным является лишь необходимость достижения определённых параметров термообработки.

Фторопластовый адгезионный слой изготавливается из взвеси тонкодисперсного политетрафторэтилена (ПТФЭ) или его сополимеров в растворителях различных типов, к которым иногда добавляют поверхностно-активные добавки. Суспензию наносят на полиимидную плёнку различными способами (окунанием, пульверизацией, поливом и пр.) и высушивают при температурах до 100 градусов Цельсия. Плёнка с высушенной суспензией подвергается термообработке в печах при температурах до 360 °С. При термообработке происходит подплавление фторопластовых частиц и их закрепление на поверхности полиимида [1].

При термообработке провода необходимо достигнуть температуры, при которой произойдет повторное подплавление фторопластового слоя для закрепления его между слоями плёнки или с жилой. Температура подплавления различных модификаций фторопластового слоя может варьироваться от 260 до 330 °С. Задача технолога – добиться оптимальной температуры подплавления во время термообработки жилы.

Влияние окисления поверхности медной жилы положительно сказывается на адгезионной прочности сварного соединения медь–плёнка. Слой оксидных плёнок, который возникает во время предварительного подогрева жилы на её поверхности, растёт по диффузному механизму (монооксид меди  $\text{Cu}_2\text{O}$  и полуторный оксид меди  $\text{Cu}_2\text{O}_3$  при нагревании выше 250 °С). При нормальных климатических условиях плёнка из оксида меди  $\text{CuO}$  всегда присутствует на поверхности жилы и достигает толщины до 2,4 нм. Она имеет аналогичный цвет с медной поверхностью и является полупрозрачной. При нагревании меди свыше 250 °С начинается более интенсивное окисление и активный рост оксидных плёнок. На поверхности меди начинают возникать цвета побежалости, имеющие различный оттенок, начиная от розового и заканчивая чёрным. Образовавшийся полуторный оксид меди является нестабильным и распадается на оксид меди и кислород. Через оксидную плёнку начинают диффундировать к её поверхности ионы меди (возможна диффузия атомов меди) и образуют там зону роста, а кислород диффундирует к границе медь–кислород и образует зону роста на этой границе. В результате такого роста внешняя по-



Рис. 4. Усилие на отрыв при растяжении сварного соединения медь–плёнка до окисления поверхности меди в зависимости от степени деформации

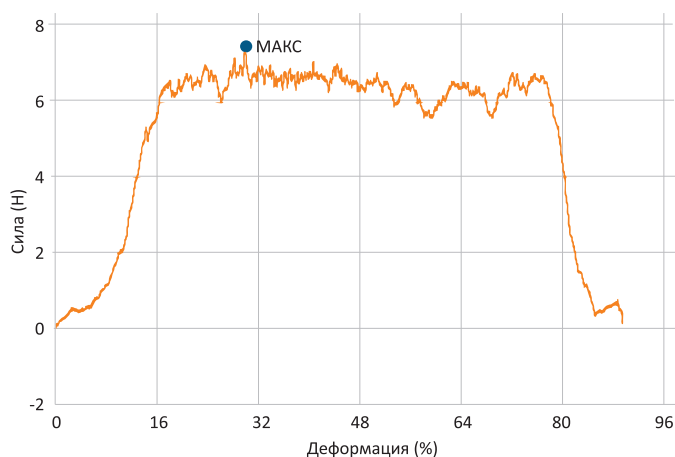


Рис. 5. Усилие на отрыв при растяжении сварного соединения медь–плёнка после окисления поверхности меди в зависимости от степени деформации

верхность оксидной плёнки приобретает электростатический заряд [2, 3].

На рис. 4 и 5 показаны зависимости усилия на отрыв при растяжении сварного соединения медь–плёнка до и после окисления поверхности меди в зависимости от степени деформации.

Графики на рис 4, 5 показывают, что после окисления поверхности меди отрыв ПМФ-плёнки от меди увеличивается. Таким образом, образование оксидных плёнок значительно повышает адгезию изоляции к ТПЖ.

Во время термообработки изоляции провода достигается температура до 330 °С между жилой и ПМФ-плёнкой и в слоях ПМФ-плёнки, что приводит к

спеканию изоляции. Общеизвестно, что ПТФЭ и, соответственно, плёнки на его основе или его сополимеров, имеют очень слабые силы адгезионного взаимодействия как химического, так и физического.

Критерием спекания является наибольшая адгезия, которая характеризуется усилием на отрыв двух склеенных ПМФ-плёнок или ПМФ-плёнки с медью. Процессом, определяющим температуру спекания, является фазовый переход 2 рода (так называемое подплавление), который возникает ранее фазового перехода 1 рода (температуры плавления). Фазовый переход 2 рода придаёт молекулам ПТФЭ повышенную текучесть и подвижность и позволяет молекулам ПТФЭ заполнить все «пустоты» и обеспечить максимально плотное прилегание к поверхностям. Физически на молекулярном уровне ПТФЭ закрепляется на поверхности материала. Значение имеет не только достижение необходимой температуры, но и время выдержки при ней, достаточное для завершения фазового перехода 2 рода всей массы материала и прохождения необходимых процессов [4].

Как видно из рис. 6, усилие на отрыв меняется в зависимости от режима термообработки значительно. Поэтому при отработке режима термообработки ТПЖ с наложенной ПМФ-плёнкой будет недостаточно максимально быстро нагреть провод и достичь заданной температуры для получения максимально возможной адгезионной прочности сварного соединения. Главное – достигнуть фазового перехода 2 рода во всей массе фторопластового слоя ПМФ-плёнки, не превышая достаточной температуры спекания и не вызывая деструкции материалов. Для этого необходим баланс между временем выдержки и температурой термообработки.



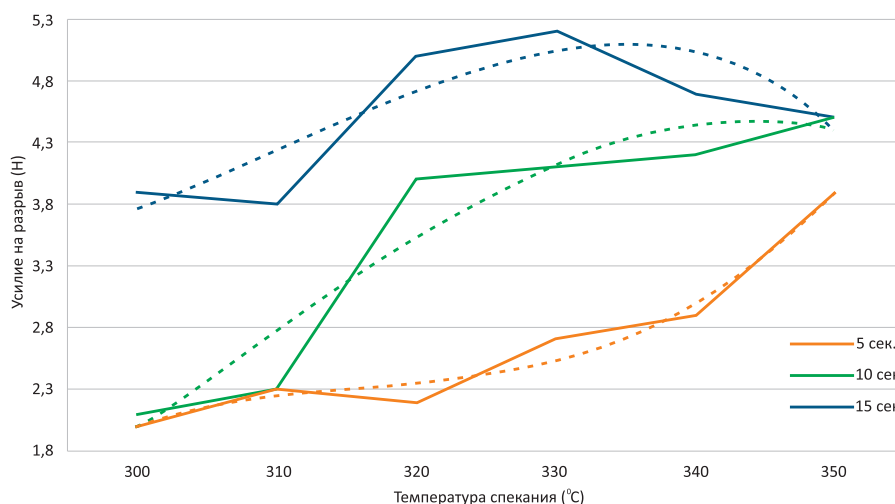


Рис. 6. Зависимость адгезионной прочности сварного соединения медь–плёнка (плёнка шириной 12,5 мм и толщиной 40 мк) от температуры спекания и времени выдержки при этой температуре

Серьёзной проблемой в технологии наложения фторопластового слоя при изготовлении ПМФ-плёнки является практически полное отсутствие адгезии к другим материалам. Поэтому необходима активация материала фторопластового покрытия.

Существуют два метода активации: химический и электрический. Химический метод активации имеет преимущество при обработке сложных деталей. Однако его использование связано с применением токсичных материалов и химически агрессивных веществ. При химическом способе активации предпочтительен метод обработки растворами натрия в аммиаке или тетрагидрофуране или дисперсией натрия в органическом растворителе. Химический метод обеспечивает наиболее высокую адгезию к фторопласту и широко используется в технике. Электрический метод активации более безопасен, но требует дорогостоящего оборудования и может проводиться только до определённых толщин изделий, при которых возможно возникновение разрядов между электродами [1].

Тем не менее, производители ПМФ-плёнок в основном используют электрический метод активации, который в достаточной степени улучшает адгезионные свойства. Активация фторопластового покрытия происходит в тлеющем разряде (в условиях атмосферной плазмы). В результате бомбардировки электронами поверхности происходит деструкция макромолекул с образованием свободных алкильных радикалов, которые в дальнейшем переходят в присутствии воздуха в устойчивые перекисные, придающие поверхности достаточную адгезионную активность к используемым материалам. В отличие от химической обработки при действии тлеющего разряда практически не образуется двойных сопряжённых связей, и полимер приобретает коричневую окраску. При обработке тлеющим разрядом происходит разрушение углерод-углеродных связей сополимера с образованием фторалкиль-

ных радикалов. При электрической активации происходит удаление слабых приповерхностных слоёв, содержащих органические загрязнения, происходит интенсивная дегазация поверхностных слоёв, аморфизация и деформирование поверхности. В процессе активации изменяется геометрия поверхности, увеличивается степень шероховатости, с увеличением которой увеличивается площадь межфазного взаимодействия, что способствует увеличению адгезии. Степень шероховатости можно контролировать временем обработки и мощностью разряда [5, 6].

Именно благодаря подобной активации фторопластовый слой ПМФ-плёнки способен приобретать существенную адгезию к медной проволоке и полиимидной ПМФ-плёнке при термообработке на кабельной производственной линии.

Кроме химических связей адгезию фторопластового слоя частично обеспечивает и межмолекулярное взаимодействие (силы Ван-дер-Ваальса и дисперсионные силы). Дисперсионные силы возникают за счёт собственных дипольных моментов атомов и молекул, а силы Ван-дер-Ваальса за счёт поляризации молекул и образования диполей. Оба типа сил обеспечивают взаимодействие, так как при спекании изоляции присутствуют поляризованные диполи за счёт наличия электрических зарядов во взаимодействующих слоях и есть собственные дипольные моменты у входящих во взаимодействие молекул различных веществ. Соответствующие электрические заряды получаются как в результате окисления поверхности меди, так и в результате электрической активации тлеющим разрядом фторопластового слоя ПМФ-плёнки [7].

В производстве при определении оптимальной температуры спекания плёночной изоляции кроме прямых экспериментов может быть использован расчёт температуры провода в печах, изменяющийся по мере движения провода. Исходными

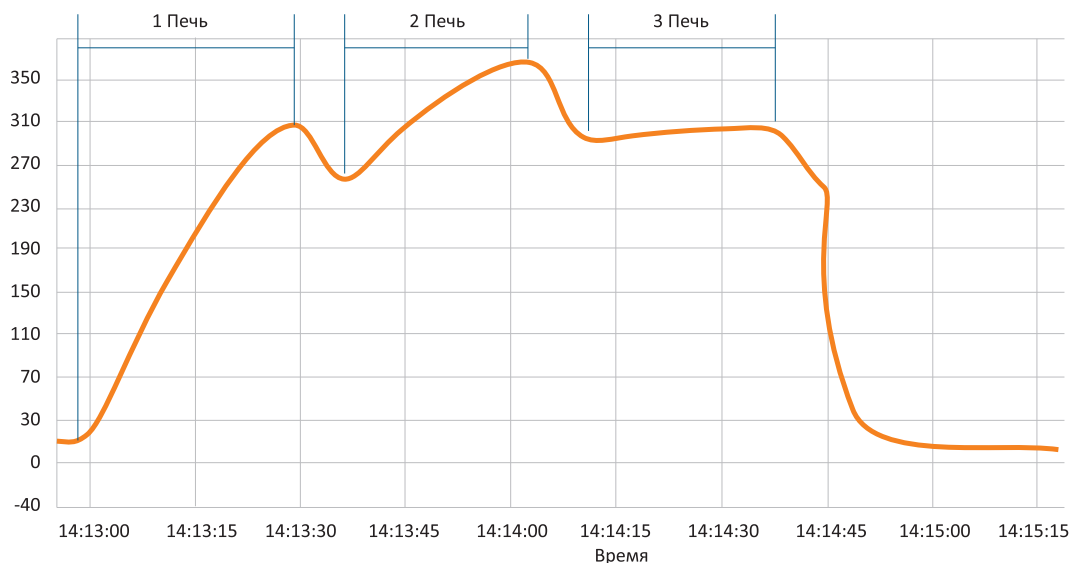


Рис. 7. Градиент температур в печах термообработки

данными для расчёта является совокупность таких параметров, как требуемая температура, длина нагревательной части печи, длина и скорость протяжки провода [8].

На рис. 7 показана зависимость достигаемой проводом температуры от времени протяжки провода через три печи. Для оптимального воздействия температуры на систему жила/изоляция необходимо иметь повышающийся градиент температур в печах. Это создает более плавный прогрев провода по толщине изоляции и металла.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Принципиально важными являются расчёт режима обмотки и расчёт нагрева провода с последующим спеканием изоляции. Без предварительных расчётов определение оптимального технологического режима требует значительного количества времени и материальных средств. Обычно, при потере качественных характеристик провода в рамках стабильного режима технологи проводят корректировку методом проб и ошибок, опираясь на свой производственный опыт. Очевидно, при существовании надёжной модели процесса поиск оптимальных параметров режима переработки был бы существенно более производительным. Более эффективно разработать компьютерные программы, обеспечивающие на основе массива данных расчёт технологического режима, который при вводе небольшого количества данных будет близок к оптимальному.

В соответствии с представленными рекомендациями и методикой расчёта были рассчитаны параметры производственного технологического режима изготовления обмоточных проводов различных маркоразмеров с изоляцией из ПМФ-плёнки.

Усовершенствованные технологические режимы обеспечили требуемое качество проводов, подтверждённое как на заводе-изготовителе, так и у потребителей. Кроме того, производительность труда при использовании усовершенствованной технологии выросла ориентировочно на 18 %.

### Список литературы

1. **Паншин Ю.А., Малкевич С.Г., Дунаевская Ц.С.** Фторопласты. – М.: Химия, 1978. – 231 с.
2. **Грушевская С.Н., Елисеев Д.С., Ганжа С.В., Введенский А.В.** Свойства полупроводниковых оксидов меди // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2013. – Т. 15, № 3. – С. 253–265.
3. **Нагурянская Ю.Н., Власов Е.А.** Формирование каталитически активных оксидных плёнок на поверхности латуни и меди // Химия и технология неорганических веществ. – 2015. – № 14. – С. 17–22.
4. **Коршак В.В.** Термостойкие полимеры. – М.: Наука, 1969. – 381 с.
5. **Кирюхин Д.П., Кичигина Г.А., Бузник В.М.** Тепломеры тетрафторэтилена: радиационно-химический синтез, свойства и перспективы использования / Институт проблем химической физики Российской академии наук // Высокомолекулярные соединения, Серия А. – 2013. – Т. 55, № 11 – С. 1321–1332.
6. **Бобылёва А.В., Берлянт С.М., Клишпонт Э.Р.** Высокомолекулярные соединения, Изучение реакций перекисных радикалов во фторсодержащих полимерах. – М.: Научно-исследовательский физико-химический институт имени Л.Я. Карпова, 1977. – С. 360–364.
7. **Мякишев Г.Я, Синяков А.З.** Молекулярная физика. Термодинамика. – М.: Дрофа, 2001. – 352 с.
8. **Мещанов Г.И.** Термообработка проводов с плёночной изоляцией // Кабели и провода. – 2004. – № 5 (288). – С. 10–12.