

# НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ

## технологии, оборудования и производства теплостойких проводов с пленочной полиимидно-фторопластовой изоляцией

Всероссийский научно-исследовательский институт кабельной промышленности на протяжении последних десятилетий целенаправленно работал над созданием теплостойких проводов с пленочной полиимидно-фторопластовой изоляцией, современного технологического оборудования и эффективной технологии для их производства.

Комплексный подход при решении указанных вопросов – это классический пример современного понятия «инновация», то есть создание нового продукта, востребованного рынком и коммерчески успешного. Инновации, как известно, рождаются на пересечении массовых потребностей и платежеспособного спроса. Основной спрос на теплостойкие провода был связан в первую очередь с погружными электродвигателями электронасосов нефтедобычи.

Характерными особенностями погружных электродвигателей являются жесткие ограничения габаритных размеров, определяемые размером скважины и диаметром обсадной трубы, и необходимость обеспечения повышенной надежности при тяжелых условиях эксплуатации, поскольку их замена в глубоких нефтяных скважинах, связанная с демонтажем всей насосной установки и вынужденным простоем скважины, приводит к огромным материальным затратам. Эксплуатация погружных электродвигателей сопровождается значительным перегревом обмоток, электрическими и механическими перегрузками. Рост мощности погружных электродвигателей насосов добычи нефти в последние десятилетия привел к тому, что их длина увеличилась до 8 м, а рабочее напряжение до 3300 В. Увеличение мощности электродвигателя и КПД при заданных габаритах поставило задачу повышения длительно допустимых рабочих температур обмотки до 200–220 °С с перегревом до 250–260 °С.

С учетом особенностей конструкции и условий эксплуатации погружных электродвигателей насосов добычи нефти к электрической изоляции обмоточных проводов предъявляются весьма жесткие требования.

В первую очередь, это стойкость изоляции к длительному воздействию окружающей среду при высоких температурах эксплуатации и перегрева, указанных выше. Изоляция провода должна быть герметичной. Это связано с тем, что изоляционное масло, находящееся внутри маслозаполненного электродвигателя, в процессе эксплуатации увлажняется за счет диффузии воды через подвижные уплотнения и материалы системы гидрозащиты. Возможно также попадание пластовой жидкости внутрь электродвигателя в аварийном режиме.

Особенностью конструкции погружных электродвигателей является то, что статор имеет полностью закрытый паз, в результате чего статорные обмотки изготавливаются методом последовательной протяжки через пазы по определенной схеме. Такая специфика изготовления обмоток при весьма больших длинах статора предъявляет исключительно высо-

кие требования по устойчивости к различным механическим воздействиям (стирание, продавливание, сдир и др.).

Повышение рабочих напряжений электродвигателей при одновременном снижении толщины изоляции проводов вплоть до 0,15 мм предъявило повышенные требования к электрической прочности изоляции. При этом важным фактором является стабильность электрических характеристик по длине и отсутствие мест с поврежденной или с ослабленной изоляцией на длине фазы, достигающей 250–300 м, что является достаточно жестким требованием.

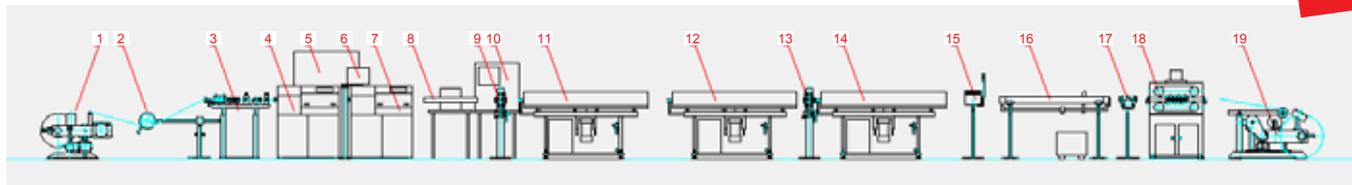
Одним из важнейших, специфических факторов эксплуатации электронасосной установки в целом и электроизоляционной системы с обмоточным проводом в погружном электродвигателе является работа под большим гидравлическим давлением окружающей среды (жидкости). В скважинах глубиной свыше 1,5 км это давление достигает 25 МПа и более.

Для указанных целей был разработан круглый теплостойкий обмоточный провод марки ППИ-У [1]. Изоляция провода выполнена на основе полиимидно-фторопластовой пленки и удовлетворяет изложенным выше требованиям к изготовлению и эксплуатации погружных электродвигателей. Провода марки ППИ-У выпускаются по ТУ 16-705.159–80 с номинальным диаметром жилы от 1,06 до 3,15 мм.

Для изготовления статорных обмоток электрических машин другого типа, но также с крайне тяжелыми условиями эксплуатации, к которым следует отнести электродвигатели железнодорожного и городского транспорта, электрические машины карьерного оборудования, специальные типы электрических машин, обладающие уникальными характеристиками, разработаны обмоточные нагревостойкие провода прямоугольного сечения марок ППИПК-Т, ППИПК-1, ППИПК-2. Их выпускают по ТУ 16.К71–202–93 [2].

Безусловно, созданию новых типов теплостойких проводов способствовало появление новых нагревостойких полимерных материалов на основе полиимидов. Применение комбинированных полиимидно-фторопластовых пленок позволило путем обмотки токопроводящей жилы лентами с последующей термообработкой получать провода с монолитной герметичной изоляцией, обладающие повышенной нагревостойкостью, высокими значениями и стабильностью по длине электрической и механической прочности изоляции при ее малой толщине.

Полиимидно-фторопластовая пленка представляет собой комбинированный (дублированный) материал. В качестве основного слоя пленки используют полиимид, покрываемый затем слоем политетрафторэтилена или других фторсодержащих сополимеров. Пленка выпускается с односторонним и двухсторонним покрытием. Толщина отечественной односторонней пленки типа ПМФ-С-351 составляет 40 мкм (при толщине покрытия 10 мкм и толщине основы 30 мкм),



- |                                  |   |                                 |
|----------------------------------|---|---------------------------------|
| 1. Отдающее устройство УОУп-630; | 6. Панель управления;                         | 16. Узел охлаждения;            |
| 2. Компенсатор;                  | 8, 10. Индукционная нагревательная установка; | 17. Мерное устройство;          |
| 3. Устройство подготовки жилы;   | 9, 13. Обжимные устройства;                   | 18. Устройство тяговое;         |
| 4, 7. Лентообмотчики ОГЦУ-1;     | 11, 12, 14. Туннельные электроды;             | 19. Устройство приемное УПП-630 |
| 5. Шкаф управления;              | 15. Испытание на пробой;                      |                                 |

Рис. 1. Структурное построение линии для изготовления круглых и прямоугольных нагревостойких проводов с пленочной изоляцией

а двусторонней типа ПМФ-С-352 составляет 50 мкм. У пленки «Каптон» (фирма DuPont, США) толщина основы 25 мкм, а покрытия – 12,5 мкм.

### Особенности конструкции технологического оборудования для производства теплостойких проводов с пленочной изоляцией

Современное производство теплостойких проводов с пленочной изоляцией строится по принципу «in line», когда основные технологические операции – спиральная обмотка токопроводящей жилы полиимидно-фторопластовой пленкой и термообработка с целью спекания (сваривания) слоев пленки между собой совмещены [3]. Оборудование, построенное по такому принципу, позволяет добиться высокой степени автоматизации, обеспечить эффективность процесса производства и высокое качество изделий.

На рис. 1 показано структурное построение обмоточной линии с совмещенными технологическими операциями. Такая линия позволяет выпускать провода как круглого, так и прямоугольного сечений. Линия построена по модульному принципу, когда каждое функциональное устройство, входящее в состав линии, конструктивно выполнено в виде самостоятельного модуля. Такое построение оборудования позволяет в сочетании с гибкой системой управления с применением промышленного контроллера и системой «электрического вала» управления электроприводами легко компоновать состав линии в зависимости от технических требований к оборудованию.

Первый технологический узел линии состоит из двух обмотчиков центрального типа. Два обмотчика позволяют получить различные конструкции проводов и обеспечивают наложение изоляционного покрытия, содержащего до шести слоев пленки. Важным для получения хорошего качества и высокой производительности является применение обмотчиков центрального типа, где используются бобины с крестовой намоткой либо с намоткой типа «step-pak». В этом случае удается получить практически непрерывный процесс производства проводов с минимумом остановок на перезаправку головок обмотчиков лентами и, как следствие, получать значительные строительные длины. Применение бобин увеличенной емкости реализует еще одно замечательное свойство бобин, а именно то, что пленка в бобине намотана с постоянным натяжением по всей длине ленты, а это значит, что обмотчик наматывает пленку на токопроводящую жилу с постоянным натяжением, обеспечивая необходимое давление между слоями пленки по всей строительной длине изготовления провода, существенно снижая риски получить

низкую адгезию в местах, где происходила смена бобины. Обычно используются ленты шириной 10,0–18,0 мм.

Качественное наложение изоляционного покрытия методом обмотки во многом определяет качество изделия. Обмотка лентой должна осуществляться с постоянным шагом, без морщин и с постоянным натяжением ленты. Для поддержания заданного натяжения ленты в процессе смотки бобины используется регулируемый асинхронный электропривод с частотным управлением. На рис. 2 показана головка лентообмотчика с бобиной крестовой намотки.

Другим важным технологическим узлом линии является узел термообработки. В [4] показано, что с целью обеспечения качественной сварки пленок при температурах 320–360 °С и эффективности процесса термообработки целесообразно применение комбинированного нагрева. Комбинированный нагрев реализует нагрев изоляционного слоя как со стороны меди, так и со стороны наружных слоев пленки.

Для нагрева медной жилы используется высокочастотный генератор с петлевым или цилиндрическим индуктором. Целесообразность использования высокочастотного нагрева возрастает с ростом сечения жилы. Для проводов прямоугольного сечения его применение обязательно. Современные высокочастотные полупроводниковые преобразователи выполняются с применением IGBT транзисторов, позволяющих получить КПД установки не ниже 95 %. IGBT транзисторы обладают высокой надежностью, а преобразователи с их применением обладают низкими массо-габаритными показателями. На рис. 3 показан преобразователь типа PC 720/50 фирмы CEIA (Италия) с цилиндрическим индуктором. После высокочастотного нагрева для последующей термообработки слоев пленки используются проходные печи сопротивления (рис. 4). Печи сопротивле-



Рис. 2. Головка лентообмотчика с бобиной крестовой намотки



Рис. 3. ВЧ преобразователь фирмы CEIA (Италия)



Рис. 4. Проходные печи сопротивления для термообработки проводов с пленочной изоляцией

ния представляют собой двухметровые камеры нагрева модульного типа с отдельным остовом и пневматическим механизмом подъема, который используется при заправке линии и защищает изоляцию провода при остановке линии в штатных и аварийных режимах работы.

При производстве прямоугольных проводов из-за известного эффекта «припухлости» изоляции (явление «бочкообразности» по большей стороне провода) обяза-



Рис. 5. Обжимное устройство

тельно используют обжимные устройства, установленные между печами (рис. 5).

Система управления линией, построенная на базе промышленного контроллера серии CJIM (Omron), позволяет:

- контролировать параметры каждого модуля линии: работу обмотчиков, печей сопротивления, генератора, приемно-отдающего и тянущего устройств и др.;
- редактировать параметры каждого модуля, обеспечивая требуемую технологию изготовления провода;
- осуществлять оперативную диагностику узлов линии, анализируя их статусную информацию (наличие аварий, сигналов готовности и проч.);
- сохранять и загружать параметры линии, существенно уменьшая время настройки оборудования при смене типоразмеров изделий;
- обеспечить оптимальные с точки зрения производительности и качества стабильные режимы эксплуатации оборудования. Исключить влияние «человеческого фактора», обеспечить экономию материалов.

Система управления линией выполнена распределенного типа и объединяет основные ее составляющие (промышленный контроллер, программируемую сенсорную панель оператора, частотные преобразователи серии F7 (Omron) и др. в единую промышленную сеть (DeviceNet). Цифровая шина данных (CAN) позволяет контроллеру синхронно управлять исполнительными механизмами технологической линии с высокой скоростью обмена данных.

Сенсорная панель оператора NS12 (Omron) позволяет осуществлять оперативное управление всей линией, обеспечивает наглядное представление статусного состояния каждого модуля линии, индикацию основных параметров, а также ввод технологических параметров, определяющих конструкцию изделия (рис. 6).

### **Особенности технологического процесса производства теплостойких проводов с пленочной полиимидно-фторопластовой изоляцией, производительность оборудования**

Качественное наложение изоляционного покрытия обмотчиками во многом определяет качество изделия. Обмотка лентами должна осуществляться с постоянным шагом, без морщин и с заданным постоянным натяжением.



Рис. 6. Сенсорная панель и шкаф управления линией

Важным для получения хорошего качества провода и высокой производительности оборудования является обоснованный выбор ширины ленты. При выборе оптимальной ширины ленты приходится решать задачу поиска компромисса между противоречивыми факторами. Стремясь к высокой производительности за счет применения широких лент можно не достигнуть хорошего качества обмотки, так как качество наложения обмотки лучше при использовании более узких лент. В этом случае лента ложится с большей перпендикулярной составляющей натяжения без складок, морщин и воздушных включений. Таким образом, в зависимости от конструкции изделия и величины токопроводящей жилы существует свой оптимальный размер ширины ленты.

Например, для провода диаметром 2,0 мм при конструкции, когда первый по движению провода обмотчик накладывает ленту с перекрытием 66 %, а второй – 50 % целесообразно использовать пленку на первом обмотчике шириной 17 мм, а на втором 12 мм.

Теория обмотки довольно подробно представлена в [5]. Известно, что обмотка характеризуется несколькими параметрами, изменением которых можно обеспечить требуемую ширину зазора или перекрытия для заданных диаметров заготовки, ширины и толщины ленты, а также разные плотности и углы наклона, с которыми накладываются пленки.

Необходимо отметить, что из практики линейную скорость технологической линии выбирают, как правило, из условий термообработки, а шаг обмотки – исходя из геометрических размеров изолируемой жилы и пленки и только затем подбирают частоту вращения обмотчиков.

Шаг обмотки  $h$  связан с линейной скоростью перемещения токопроводящей жилы  $V_{\lambda}$  соотношением

$$h = \frac{V_{\lambda} \times 10^3}{n_{об}}, \text{ мм,}$$

где  $n_{об}$  – частота вращения обмотчика, об/мин.

Обмоточная линия построена по принципу, когда ведущим звеном является тяговое устройство, а ведомым обмотчик, то есть сигнал задания линейной скорости поступает на тяговое устройство, а с датчика линейной скорости на обмотчики. Такое построение линии позволяет легко по системе электрического вала в статических и динамических режимах работы линии поддерживать соотношение линейной скорости и частоты оборотов обмотчиков.

Из приведенной зависимости следует, что для обеспечения постоянства шага обмотки при изменении, например, линейной скорости необходимо изменение частоты вращения обмотчика. При этом, чем выше частота вращения обмотчика при постоянном шаге, тем больше должна быть линейная скорость процесса обмотки и, следовательно, более высокой будет производительность линии. Таким образом, требование определенной точности поддержания шага обмотки непосредственно связано с точностью поддержания скорости перемещения жилы и частоты вращения обмотчика и их соотношения.

Колебания шага обмотки на практике заставляют увеличивать перекрытие изолирующей ленты по сравнению с заданным для того, чтобы исключить производство проводов с недопустимо малым перекрытием, снижающим качество провода. При этом, естественно, увеличивается ее расход. Так при ширине ленты 11,9 мм и сечении провода  $2,12 \times 9,0$  мм изменение коэффициента перекрытия  $K_{\lambda}$  с 0,5 до 0,65 приводит к увеличению на 11 % расхода ленты. Отсюда точность поддержания шага приобретает особое значение.

Из анализа технических данных обмоточного оборудования, рекомендаций по режимам обработки изделий установлено, что допустимая погрешность согласования рабочих скоростей жилы и обмотчика не должна превышать 10 %. На точность поддержания шага влияют и другие факторы, в частности, действие потоков воздуха на поверхность ленты, что приводит к неконтролируемым колебаниям шага обмотки.

Основным фактором, определяющим плотность наложения изоляции, является натяжение ленты. В свою очередь, выбор оптимального значения натяжения ленты зависит от таких свойств материала, как механическая прочность при растяжении и относительное удлинение, исходя из которых устанавливаются предельные значения

натяжения ленты. Опыт производства проводов показал, что наилучшее качество провода получается в том случае, когда пленка накладывается с натяжением, обеспечивающим относительное удлинение в 10–15 %, то есть в пределах высокоэластичной деформации материала. Для отечественной пленки типа ПМФ-С-352 шириной 10 мм и толщиной 50 мкм относительному удлинению 10–15 % соответствует сила натяжения 40,0–45,0 Н. При больших удлинениях наблюдается образование складок на поверхности токопроводящей жилы, а также растрескивание при термообработке. При меньшем значении натяжения пленки, когда создается давление на внутренние слои менее  $4 \times 10^5$  Па [5], наблюдается частичное расслоение пленочной изоляции после ее термообработки, приводящее к снижению стабильности характеристик изоляции по длине провода.

Система поддержания натяжения ленты выполнена на базе регулируемых частотных приводов и обеспечивает постоянство натяжения до полной выработки бобин в процессе работы линии.

На рис. 7 показан график зависимости оптимальной линейной скорости линии  $V$  в зависимости от сечения токопроводящей жилы  $S$  и рекомендуемые ширины лент  $H$ . Как видно из графика, скорость линии резко падает

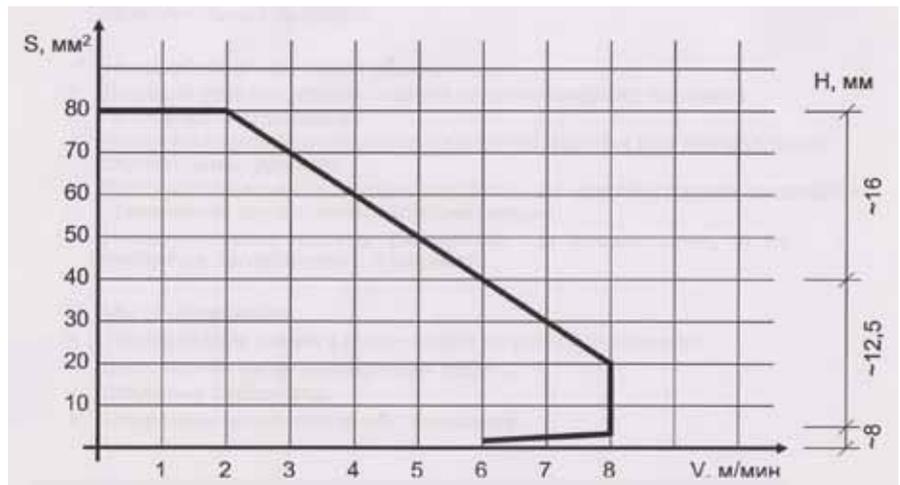


Рис. 7. Зависимость линейной скорости линии от сечения провода

с ростом сечения жилы, что говорит о том, что лимитирующим фактором в этом случае является термообработка.

При малых значениях сечений (менее 3 мм<sup>2</sup>) лимитирующим фактором является обмотка.

За последнее десятилетие было создано несколько эффективных узкоспециализированных производств, где успешно эксплуатируется оборудование фирмы «ВНИИКП-Маш», причем для некоторых организаций ОАО «ВНИИКП» был разработан рабочий проект производства. На рис. 8 показан цех производства обмоточных теплостойких проводов с пленочной изоляцией, созданный в 2011 г. в г. Лысьва Пермского края.



Рис. 8. Цех производства обмоточных теплостойких проводов с пленочной изоляцией

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гнедин А.А., Мещанов Г.И. Новые конструкции обмоточных проводов с пленочной изоляцией для погружных электродвигателей насосов нефтедобычи // *Электротехника*. – 1986. – № 1.
2. Бугрова Л.Д., Виноградова Т.Т., Гнедин А.А., Мещанов Г.И. Прямоугольные

- обмоточные провода с пленочной изоляцией для электродвигателей, работающих в тяжелых условиях // *Электротехническая промышленность*. Сер. Кабельная техника. – 1984. – Вып. 7 (233).
3. Мещанов Г.И. Особенности разработки кабелей и проводов для экстремальных

- условий эксплуатации // *Кабели и провода*. – 2010. – № 3 (322).
4. Мещанов Г.И. Термообработка проводов с пленочной изоляцией // *Кабели и провода*. – 2004. – № 5 (288).
5. Пешков И.Б. Обмоточные провода. – М.: Энергоиздат, 1995.