

ОСОБЕННОСТИ ТЕРМООБРАБОТКИ ПЛЁНОЧНОЙ ИЗОЛЯЦИИ БОРТОВЫХ ПРОВОДОВ В ПЕЧИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ТИПА

SPECIFICS OF HEAT TREATMENT OF FILM INSULATION OF AIRCRAFT WIRES IN A VERTICAL FURNACE

М.А. Боев, Dr. Sc. (Engineering), Professor, FGBOU VO National Research University MEI, full member of the Academy of Electrotechnical Sciences of the Russian Federation;

А.М. Китов, Chief Metrologist, ОКБ КП;

Д.С. Теляшкин, Production Engineer, post-graduate student, FGBOU VO NO National Research Tomsk Polytechnic University;

К.А. Харитонов, Production Engineer, post-graduate student, FGBOU VO National Research Tomsk Polytechnic University

М.А. Боев, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», действительный член Академии электротехнических наук РФ;

А. М. Китов, главный метролог, АО «ОКБ КП»;

Д.С. Теляшкин, инженер-технолог, аспирант, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»;

К.А. Харитонов, инженер-технолог, аспирант, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Аннотация. Произведён анализ технологии термообработки плёночной изоляции бортовых проводов и кабелей в вертикальной печи конвекционного типа. Проведена экспериментальная оценка скорости потока воздуха в муфеле электрической печи в зависимости от положения дросселя-клапана вытяжной вентиляционной системы и диаметра входного и выходного отверстий печи. Определены соотношения статических и динамических характеристик распределения температуры воздуха внутри печи от положения дросселя-клапана с рассекателем и без него. Регистрация фактических температурных значений производилась с помощью термоэлектрического преобразователя.

Предложены методы управления основными технологическими факторами, влияющими на стабильность распределения температуры воздуха внутри муфеля печи. Предложен метод оценки качества спечённой изоляции кабельного изделия. Результаты данного исследования нашли практическое применение на производстве кабельных изделий.

Ключевые слова: термообработка, плёночная изоляция, спекательная установка, воздушный поток, распределение температуры

Abstract. The process of heat treatment of film insulation of aircraft wires and cables in a vertical convection furnace was analyzed. The air flow rate in the electric furnace muffle was evaluated depending on the position of the throttle valve of the exhaust ventilation system and the diameter of the furnace inlet and outlet. The static and dynamic characteristics of the air temperature distribution inside the furnace were determined depending on the position of the throttle valve with and without a splitter. The actual temperature values were recorded using a thermoelectric transducer.

Methods of controlling the main technological factors affecting the stability of the air temperature distribution inside the furnace muffle are suggested. A method for assessing the quality of the sintered insulation of a cable product is proposed. The results of this study have found practical application in the production of cable products.

Key words: heat treatment, film insulation, sintering plant, air flow, temperature distribution

Материал поступил в редакцию 15.11.2023
Автор, ответственный за переписку: Боев М.А.
E-mail: maboev@mail.ru



Герметичность комбинированной изоляции бортовых проводов является решающим фактором, обеспечивающим стойкость к механическим воздействиям при эксплуатации бортовой сети. Главным недостатком проводов предыдущего поколения было отсутствие герметичности изоляции, что приводило к значительному падению электрического сопротивления при воздействии влаги [1]. Таким образом, изоляция токопроводящей жилы должна иметь специфические свойства, которые обеспечивали бы не только электрическую прочность, стойкость к интенсивным истирающим и продавливающим нагрузкам, устойчивость к термоциклическим условиям эксплуатации, но и герметичность изоляционного слоя и влагозащищённость. Основные материалы, которые зарекомендовали себя в кабельном производстве, – органические полимеры: полиэтилен, поливинилхлорид, фторопласт и прочие. Они производятся в виде порошка, гранул, плёнок или суспензий. В зависимости от вида материала применяются следующие методы наложения изоляционного слоя: плунжерование, экструзия, обмотка и пропитка соответственно.

В связи с экстремальными эксплуатационными воздействиями на бортовую электрическую сеть, изоляция провода должна иметь наряду с низкой массой хорошую защиту от механических нагрузок, перепадов температуры, конденсата различных жидкостей и других факторов. С практической точки зрения сложно реализовать совокупность необходимых параметров в рамках одного материала, поэтому в бортовых системах применяют комбинированную изоляцию. Метод наложения изоляции обмоткой оптимально подходит для изготовления бортовых проводов.

Одной из главных проблем в изготовлении проводов методом обмотки является операция термообработки плёночной изоляции, в том числе из фторопласта-4Д.

Термообработка является важной операцией технологического процесса изготовления кабельного изделия (КИ) с плёночной изоляцией. В частности, для обеспечения монолитности изоляции плёнок из политетрафторэтилена (фторопласт-4Д) необходимо создать условия их спекания (сваривания) при температуре в диапазоне 320–360 °С. [2] Для получения оптимального спекания слоёв плёночной изоляции или оболочки необходимо подобрать способ и технологический режим его термообработки, что обеспечит хорошие механические свойства кабеля, при этом принимая во внимание множество факторов, которые влияют на её качество. Такими факторами могут быть: способ теплопередачи, тип печи, радиальная толщина элемента кабельного изделия, сечение токопроводящей жилы (ТПЖ), цвет обрабатываемого материала, габаритные характеристики и конструкция спекательного агрегата, внешние факторы и т.д.

В последнее время при производстве кабелей и проводов используется оборудование, обеспечивающее комбинацию двух и более технологий, в частности обмотка проводов плёнками с термообработкой инфракрасным, конвекционным или радиационным методом. Такое оборудование не всегда подходит для проводов специального назначения. Для проводов с комбинированной изоляцией после наложения фторопласта содержащего слоя необходимо выдерживать узкий температурный интервал (около 370 °С) для обеспечения сваривания лент с образованием монолитной герметичной изоляции [3].

Режимы операции термообработки подбираются и настраиваются технологами на производстве исходя из статистических данных, как правило, полученных эмпирическим путём, что не повышает управляемости и предсказуемости процесса. Для его управляемости и достижения оптимальной запечки фторопласта представляется необходимым систематизировать влияющие на процесс технологические факторы и дополнительные внешние условия.

В данной статье рассматривается процесс термообработки кабельного изделия с плёночной изоляцией из фторопласта-4Д, производимой на агрегате запечки типа АЗФ. Технологический режим термообработки кабельного изделия на данном оборудовании является индивидуальным процессом для каждого производства по ряду причин:

- тип оборудования: конвекционная, соляная, ИК-печь;
- наличие или отсутствие водяного затвора;
- тип элемента конструкции кабельного изделия;
- сечение токопроводящей жилы;
- цель термообработки материала (термостабилизация плёночной изоляции, спекание в монолит элемента защитного покрова и т.д.).

При проведении операции термообработки в объёме изоляции происходит образование дополнительных химических связей, которые способствуют появлению пространственной химической структуры. Изоляция кабельного изделия переходит в неплавкое и нерастворимое состояние. Образование пространственной структуры называют процессом сшивания молекул полимера или структурированием [2]. От качества проведённой термообработки кабельного изделия зависит износостойкость элемента конструкции, уровень электрической прочности изоляции, деформируемость при растягивающих и сдавливающих нагрузках, стойкость к агрессивным средам и внешним воздействующим факторам. Согласно энциклопедии [4] понятие термообработки описывается как отжиг: температурное воздействие на полимерный материал до состояния расплава с последующей кристаллизацией для повышения степени кристалличес-

ности полимера, далее медленное его охлаждение после нагрева до 327 °С для снижения остаточных напряжений в структуре, называемое нормализацией. Быстрая кристаллизация приводит к большей дефектности и относительной рыхлости надмолекулярных структур [5].

На сегодняшний день на предприятии АО «ОКБ КП» используются множество типов спекающего оборудования для проведения операции термообработки, в частности печи АЗФ конвекционного типа с водяным затвором и без него. Наличие или отсутствие водяного затвора зависит от типа марки номенклатуры кабельного изделия. Провода с токопроводящей жилой из медной проволоки с серебряным или никелевым покрытием и комбинированной изоляцией из фторопластовой и полиимидно-фторопластовой ленты – основная номенклатура, выпускаемая на подобном оборудовании.

В работе рассмотрены технологические аспекты термообработки изоляции проводов в диапазоне сечения от 0,20 до 6,0 мм².

В последние годы в связи с нарастанием производственного плана возникла необходимость повышения эффективности операции термообработки для изготовления большего объема производимой продукции. Для изучения процессов, протекающих в муфеле печи при термообработке, был выбран агрегат запечки фторопласта АЗФ-4 отечественного производства.

Данное оборудование состоит из приёмного и отдающего устройства, печи, шкафа управления.

АЗФ-4 применяется для термообработки комбинированной изоляции, термостабилизации фторопластовой плёнки и спекания стеклоленты, пропитанной суспензией фторопласта-4Д. Принципиальное устройство агрегата запечки фторопласта для термообработки изоляции и оболочки провода показана на рис. 1.

С отдающего устройства через направляющую систему роликов и компенсаторов заготовка провода попадает в муфель печи (диаметром 50 мм), где происходит полимеризация изоляции, далее провод попадает на тяговую шайбу, где провод охлаждается, после он попадает на приёмное устройство. Процесс термообработки производится в один проход. Скорость термообработки 2...18 м/мин, а длина печи – 5,3 метра. Рекуперации тепла не предусмотрено. Для управления воздушным потоком применяется дроссель-клапан, относящийся к вентиляционной системе производственного участка. Печи поделены длинами на 5 зон, шахта оборудована нагревательными элементами, расположенными внутри вертикально с шагом 0,2 м.

ВОЗДУШНЫЙ ПОТОК

Агрегат АЗФ-4 спроектирован для термообработки кабельных изделий с использованием водяного затвора – водяная ванна необходима для закалки и ограничения воздушного потока, а также способствует повышению степени кристалличности полимерного

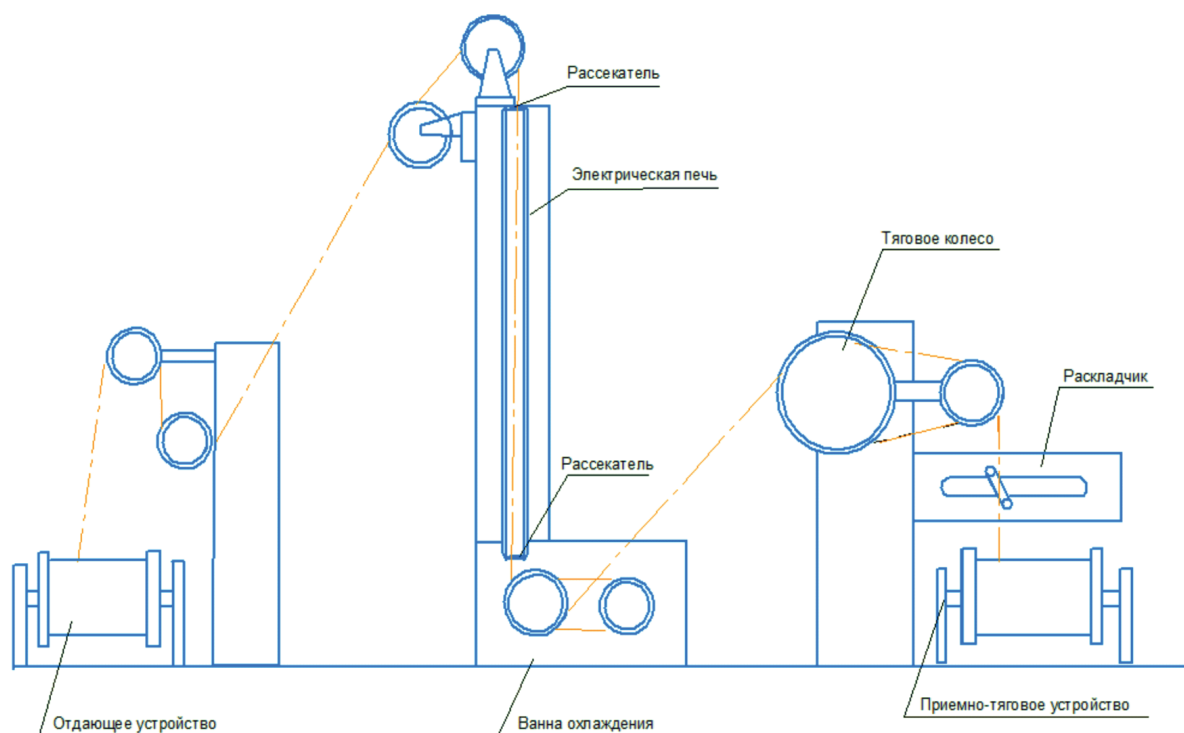


Рис. 1. Агрегат запечки фторопласта АЗФ-4



Таблица

Скорость потока воздуха в муфеле агрегата АЗФ-4 в зависимости от отверстия входного калибра, м/с

Положение дросселя-клапана, °	Скорость потока воздуха, м/с, при диаметре отверстия калибра, мм			
	5	10	20	30
90 (открытое положение)	3,8	9,0	17,0	12,5
76 (рабочее положение)	2,6	6,3	14,9	11,5
45 (среднее положение)	3,1	4,0	13,0	10,0
21 (закрытое положение)	0,3	1,8	4,0	3,5

элемента кабельного изделия. На фоне расширения номенклатуры маркоразмеров кабельных изделий в АО «ОКБ КП», в том числе изделий с плёночной не герметичной изоляцией, процесс термообработки производится, в том числе, без использования водяного затвора. Ввиду отсутствия работ по исследованию влияния воздушного потока на температуру распределения воздуха в печи, было решено провести работы по установлению управляемости процесса без водяного затвора, которые определённо зависят от диаметра входного отверстия муфеля, положения дросселя-клапана вытяжной системы и температуры нагревателей, внешних факторов производственного помещения.

Для определения влияния воздушного потока на распределение температуры внутри муфеля были проведены измерения со следующими условиями:

- скорость воздухоизмещения муфеля печи, регулируемое калибрами на входном отверстии в 10, 20, 30 мм;
- смена положения дросселя-клапана в диапазоне от 0 до 90 градусов, а именно: 21 °, 45 °, 76 °, 90 °;
- для стабилизации температуры в объёме муфеля на входное и выходное отверстия были установлены рассекатели воздуха.

Измерение воздушного потока проводилось при помощи термоанемометра типа ТТМ-2 по ГОСТ 8.361–791, позволяющего определить скорость движения воздуха. Диапазон измерения скорости воздушного потока 0,1...30 м/с.

При установке на входное отверстие муфеля калибров с отверстиями диаметрами 5, 10, 20, 30 мм получены следующие данные, приведённые в таблице.

Полученными данными подтверждается факт влияния диаметра входного отверстия калибра на изменение скорости воздушного потока внутри печи. Оптимальный теплоперенос тепловой энергии будет производиться при минимальном движении воздушной смеси внутри муфеля агрегата. Из эксперимента видно, что технологический калибр на нижнюю и верхнюю части муфеля необходимо выбирать исходя из габарита заготовки кабельного изделия с припуском по диаметру до 0,3 мм при правильном

положении заготовки кабельного изделия на оборудовании.

Для управления качеством спечённой изоляции проводилась оценка свойств изоляции кабельного изделия при помощи исследования изменения массы в процессе нагрева методом термогравиметрического анализа (ТГА), который позволяет оценить кинетические параметры процессов, обуславливающих изменение массы при нагреве.

В [6–8] излагается метод определения энергии активации по серии кривых изменения массы, полученных ТГА при разных скоростях нагрева. Если известно, что процесс, обуславливающий потерю массы, может быть описан реакцией первого порядка, то для определения энергии активации достаточно одной кривой изменения массы [9]. В [10, 11] показано, как можно определить порядок реакции по данным ТГА.

В [6, 12–14] температурный индекс эмалированных проводов оценивали, используя величину энергии активации, рассчитанную из данных по потере массы изоляции в условиях динамического нагрева на дериватографе. В [6] ресурс работы провода рассчитывали по уравнению:

$$\lg L = \frac{E}{2,303R\theta} + \lg \frac{Ep(x_k)}{\beta R} \quad (1)$$

- где L – ресурс;
 E – энергия активации;
 R – универсальная газовая постоянная;
 β – скорость нагрева;
 $p(x_k)$ – табулированная функция вида

$$p(x_k) = \frac{1}{x_k \cdot e^{x_k}} - \int_{x_k}^{\infty} \frac{dx}{x e^x} \quad (2)$$

$$x_k = \frac{E}{R\theta_k} \quad (3)$$

θ_k – температура на термограмме при соответствующей потере массы ω_k .

Величину θ устанавливали по корреляционной зависимости пробивного напряжения от ω . Уравнение (1) справедливо для реакции термодеструкции, протекающей по первому порядку. Применение метода для случая протекания сложных реакций не даёт точных результатов. Критерием применимости изложенного метода является наличие прямолинейных участков зависимости массы от температуры. Эффективность этого метода неоспорима, так как определение ресурса проводится за несколько дней в отличие от ускоренных методов, требующих проведения испытаний в течение нескольких месяцев. Сейчас этот метод стандартизирован в ОСТ В 16 0.800.441–77.

ФАКТИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

Печь агрегата запечки фторопласта включает системы нагрева заготовки кабельного изделия, контролируемую, изолирующую, вентиляционную системы. Сквозь муфелю провод проходит на заданной скорости через фторопластовую воздушную смесь, претерпевая термообработку двумя механизмами нагрева: тепловым переносом и тепловым из-

лучением. На сегодняшний день существует аналог расчёта теплового режима данного процесса, изложенный в [4] для эмальагрегатов. Согласно данной методике температура стенок муфеля в среднем на 100–150 °С выше температуры воздушной смеси. В [15] отмечается, что в данной методике не учтён момент снижения температуры после установления равновесия нагрева заготовки и воздушной смеси печи, что влияет на охлаждение заготовки внутри печи. Снижение температуры существенно влияет на физико-механические свойства изоляционного элемента кабельного изделия [16], ускоренное снижение температуры приводит к большей дефектности и относительной «рыхлости» изоляции кабельного изделия, а стабильное поддержание температуры в течение необходимого времени, напротив, приводит к большей упорядоченности структуры элемента изоляции кабельного изделия.

Для определения фактического распределения температур в АЗФ при проведении операции термообработки был проведён следующий эксперимент: при установках температуры нагревательных элементов в 400 °С на всех зонах был снят фактический температурный профиль с использованием термопары, оплетённой стекловолокном, соответствующую

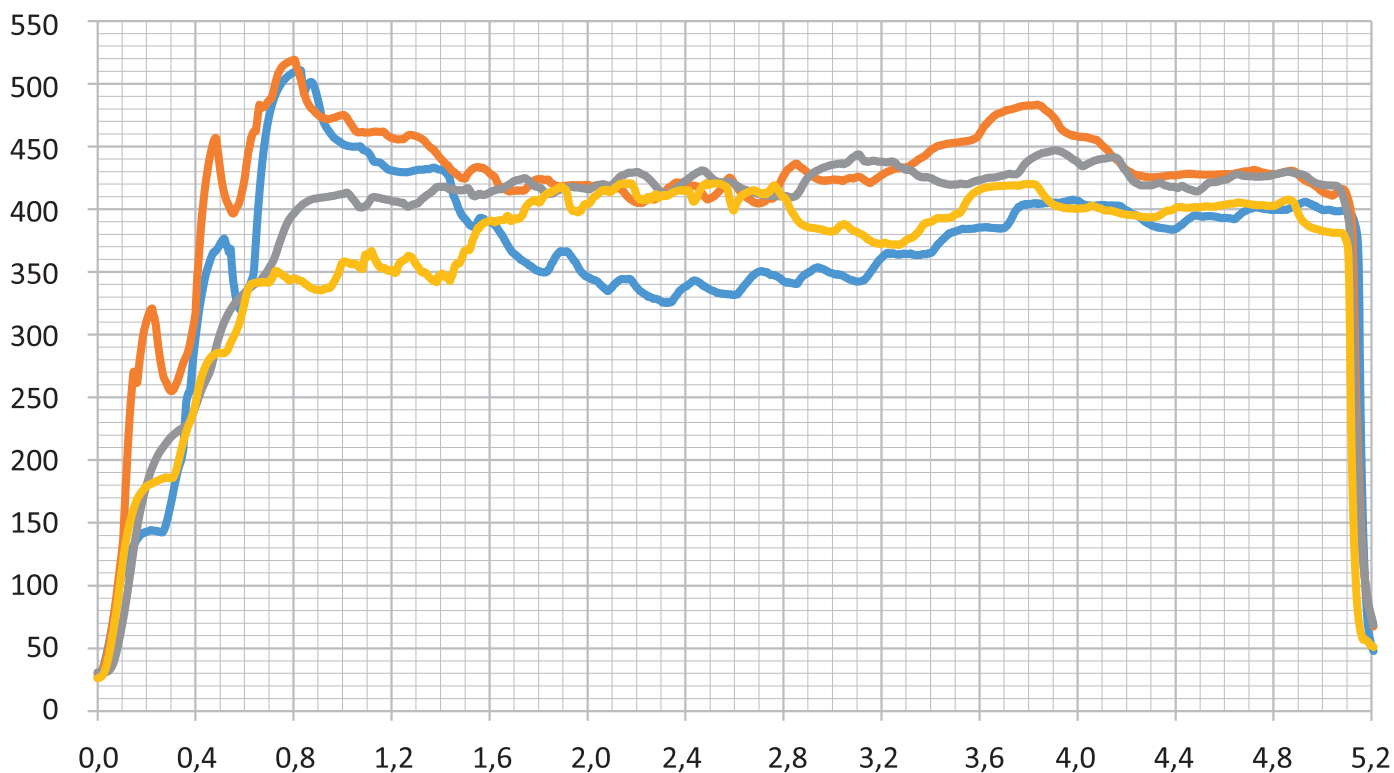


Рис. 2. Распределение температур в муфеле печи АЗФ-4 в статическом режиме для положений дроссель-клапана 21, 90° с рассекателем и без него. Красная линия – дроссель-клапан в положении 21° с рассекателем, серая линия – дроссель-клапан 21° без рассекателя, жёлтая линия – положение дросселя-клапана 90° без рассекателя, синяя линия – дроссель-клапан в положении 90° с рассекателем



щей ТУ 4211-022-57200730–2007 [17], и электронного регистратора типа «Параграф», соответствующего ТУ 4226-002-79718634–2006 [18]. Замеры проводились на различных положениях дросселя-клапана агрегата с изменением входного отверстия калибра от 5 до 30 мм.

Наиболее наглядные диаграммы распределения температур воздуха при открытом и закрытом положении дросселя-клапана с калибром 20 мм представлены на рис. 2. По оси ординат расположены фактические температуры воздуха в момент съёма, по оси абсцисс длина муфеля агрегата, поделённая для удобства снятия информации на зоны с дискретностью 0,25 м.

При измерении каждого профиля было снято 3500 измерений с дискретностью 0,5 сек. на скорости 0,5 м/мин. Из полученных данных можно сделать вывод, что максимальные температуры регистрировались при закрытом дросселе-клапане (красная линия), температура забрасывается максимально на 120 °С в первой зоне и в четвёртой зоне. Минимальные температуры зарегистрированы на профиле синего цвета при полностью открытом дросселе-клапане, плато устанавливается во второй, третьей и четвёртой зонах, при этом температура не достигает установленных 400 °С.

На участке 0–1,0 м у кривых красного и синего цвета видны забросы температуры до 320 °С на 0,25 м и 460 °С на 0,50 м, причиной их возникновения являются два фактора: первое – наличие рассекателя, ограничивающего входящие воздушные потоки внутри муфеля, второе – близкое расположение нагревательных элементов на данных участках.

Наиболее стабильная диаграмма получена при закрытом положении дросселя-клапана и без рассекателя воздуха (серая линия), плато устанавливается с 0,5–5,0 м на температуре 410–440 °С.

На стабильность температурного режима кроме положения дросселя-клапана также влияет диаметр отверстия входного и выходного калибров, которые способствуют перемешиванию воздушных масс внутри муфеля. Для определения этой зависимости в рамках эксперимента были сняты кривые распределения температур с использованием калибров с входными отверстиями в 5, 10, 20 мм. Преимущественно наглядным примером является распределение температур при калибре в 5 мм по причине наиболее правильного отношения диаметра входного отверстия и габаритов термоэлектрического преобразователя.

ВЫВОДЫ

1. Рассекатели, установленные на входе и выходе муфеля, снижают скорость воздушного потока в

нагреваемом объёме печи, вместе с тем способствуют его выравниванию по объёму печи, что обеспечивает снижение тепловых потерь при проведении операции термообработки.

2. Входное и выходное отверстия калибра, подобранные к габаритным характеристикам обрабатываемого кабельного изделия, позволяют влиять на скорость движения воздушных масс, что оптимизирует процесс термообработки.

3. Статистический анализ выхода годной продукции для бортовых проводов подтверждает эффективность внедрения полученных рекомендаций за 2022 год и первое полугодие 2023 года. За 2022 год отношение запущенной в производство токопроводящей жилы к готовой продукции выросло с 80 % (весь 2022 г.) до 90 % (первое полугодие 2023 года). Увеличение показателя объёма выпущенной продукции для сечений провода до 1 мм² составляет 14,6 %, до 6 мм² – 8,7 %.

4. Положение дросселя-клапана вентиляционной системы агрегата запечки фторопласта определяет условия теплоотвода паров фторопласта-4Д, при подборе калибра и наличии рассекателя, обеспечивает равномерную конвекцию воздушных масс внутри муфеля.

5. В ходе проведения эксперимента сложилось понимание, что для достижения высокого уровня управляемости процесса термообработки, а также для минимизации контролирующих мероприятий при изменении конструкции изоляционного элемента кабельного изделия, необходимо контролировать в исходном материале степень перестройки кристаллической надмолекулярной структуры фторопласта-4Д.

Список источников

1. Дикерман Д.Н., Кунегин С.В. Провода и кабели с фторопластовой изоляцией. – М.: Энергоиздат, 1982. – С. 49.
2. Мещанов Г.И. Обмоточные провода с монолитной изоляцией из ленточного фторопласта-4 // Электротехническая промышленность / серия Кабельная техника. 1966. Вып. 39.
3. Пешков И.Б., Леонов В.М., Рязанов И.Б., Холодный С.Д. Основы кабельной техники. – М.: Академия, 2006. – С. 63.
4. Холодный С.Д. Технологическая термообработка изоляции кабелей и проводов – 10. – М.: МЭИ, 1994.
5. Энциклопедия полимеров. – М.: Советская энциклопедия, 1977. Т. 3. – С. 1152.
6. Ларина Э.Т., Пешков И.Б., Текаева И.И. Ускоренная методика оценки температурного индекса

эмалированных проводов // Электротехническая промышленность / серия Кабельная техника. 1976. Вып. 9 (139). С. 7–9.

7. **Andercon H.C.** Order of polymer pyrolysis by thermogravimetric cycling experiments // Journal of polymer science, part B. 1964. Vol. 2, No 1. P. 115–116.

8. **Холодный С.Д.** Технологическая термообработка изоляции кабелей и проводов. – М.: МЭИ, 1994. – 160 с.

9. **Reich L.** Activation energy from a thermogravimetric trace // Journal of polymer science, part B. 1965. Vol. 3, No 1. P. 231–234.

10. **Reich L., Lee H.T., Levi D.W.** Note on the thermal degradation of teflon // Journal of polymer science, part A. 1964. Vol. 2, No 1. P. 535–538.

11. **Fuoss R.M., Salyer J.O., Wilson H.S.** Evaluation of rate constants from thermogravimetric data // Journal of polymer science, part A. 1964, Vol. 2, No 1. P. 3147–3151.

12. **Di Girbo P.M.** Using thermogravimetric analysis to determine varnish. – Magnet wire coating compability // Insu-Latian/circuits. 1975. Febr. P. 21–22.

13. **Пешков И.Б.** Вопросы надёжности и долговечности эмалированных проводов – Теория, материалы, конструирование и технология производства кабельных изделий // Труды ВНИИ КП. 1977. Вып. 20. С. 40–55.

14. **Пешков И.Б.** Теоретическая и экспериментальная разработка методов определения нагревостойкости и срока службы, создание новых нагревостойких и высокопрочных и высокопрочных эмалированных проводов: Автореф. дис. д-р техн. наук. – М.: МЭИ, 1977. – 41 с.

15. **Петров А.В.** Определение тепловых режимов эмалирования проводов // Кабели и провода. 2012. № 2 (333). С. 3–7.

16. **Соболев Г.П., Ильин А.Н.** Роль структуры материала наноразмера для изделий из фторопласта-4 // Flourine notes (Фторные заметки). 2011. № 1 (74). С. 7–8.

17. ТСМ и ТСП, ТУ 4211-022-57200730–2007. Термометры сопротивления. – М., 2008.

18. ТУ 4226-002-79718634–2006. Регистратор электронный Параграф.– С-Пб., 2010.

List of References

1. **Dikerman D.N., Kunegin S.V.** Wires and cables with fluoroplastic insulation. – М.: Energoizdat, 1982. – P. 49.

2. **Meshchanov G.I.** Winding wires with monolithic fluoroplastic tape insulation-4 // Electrotechnical industry / Cable technology series. 1966. Issue 39.

3. **Peshkov I.B., Leonov V.M., Ryazanov I.B., Kholodny S.D.** Fundamentals of cable technology. – М.: Academy, 2006. – P. 63.

4. **Kholodny S.D.** Technological heat treatment of cable and wire insulation. – 10. – М.: MEI, 1994.

5. Polymer encyclopedia. – М.: Soviet Encyclopedia, 1977. Vol. 3. – P. 1152.

6. **Larina E.T., Peshkov I.B., Tekaeva I.I.** Accelerated method for estimating the temperature index of enameled wires // Electrotechnical industry / Cable technology series. 1976, Issue 9 (139). P. 7–9.

7. **Andercon H.C.** Order of polymer pyrolysis by thermogravimetric cycling experiments // Journal of polymer science, part B. 1964. Vol. 2, No 1. P. 115–116.

8. **Kholodny S.D.** Technological heat treatment of cable and wire insulation. – М.: MEI, 1994 – 160 p.

9. **Reich L.** Activation energy from a thermogravimetric trace. // Journal of polymer science, part B. 1965. Vol. 3, No 1. P. 231–234.

10. **Reich L., Lee H.T., Levi D.W.** Note on the thermal degradation of teflon // Journal of polymer science, part A. 1964. Vol. 2, No 1. P. 535–538.

11. **Fuoss R.M., Salyer J.O., Wilson H.S.** Evaluation of rate constants from thermogravimetric data // Journal of polymer science, part A. 1964. Vol. 2, No 1. P. 3147–3151.

12. **Di Girbo P.M.** Using thermogravimetric analysis to determine varnish. – Magnet wire coating compability // Insu-Latian/circuits. 1975. Febr. P. 21–22.

13. **Peshkov I.B.** Issues of reliability and durability of enameled wires. – Theory, materials, designing and technology of cable production // Proceedings of VNIIPK. 1977. Issue 20. P. 40–55.

14. **Peshkov I.B.** Theoretical and experimental development of methods for the evaluation of enameled wire heat resistance and service life, development of new heat-resistant and high-strength enameled wires. Author's abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. – М.: MEI, 1977. – P. 41.

15. **Petrov A.V.** Determination of thermal conditions of wire enameling // Cables and Wires. 2012. No 2 (333). P. 3–7.

16. **Sobolev G.P., Ilyin A.N.** The role of nanoscale material structure for products made of fluoroplast-4. // Flourine notes. 2011. No 1 (74). P. 7–8.

17. ТСМ и ТСП, ТУ 4211-022-57200730–2007. Resistance thermometers. – М., 2008.

18. ТУ 4226-002-79718634–2006. Electronic register Paragraph. – С-Пб., 2010.