

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ОБРАБОТКИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Н.Г. Филиппенко (ИрГУПС)

Рассмотрены этапы создания научно-обоснованной методики сбора и обработки сигналов электротермического нагрева полимерных материалов. Показано, что внедрение в эксплуатацию предложенной методики на полиграфическом предприятии дало существенный экономический эффект.

Ключевые слова: полимерные материалы, высокочастотная электротермия, организация выбора и обработки сигналов, автоматизированное управление электротермией.

Введение

Рациональное использование материальных и энергетических ресурсов в промышленности связано с наличием и особенностью работы АСУТП. Для повышения эффективности требуется разработка объективных научно-обоснованных методов выбора оптимальных параметров управления ТП, особенно при скоростных режимах работы оборудования.

Использование электротермии (прямое преобразование электрической энергии в тепло) в промышленности значительно сдерживается отсутствием стройной теории организации процесса управления [1]. Это обусловлено тем, что технически сложно, а зачастую и невозможно проведение прямых измерений параметров обработки непосредственно в рабочей зоне. В связи с этим процессы одного из наиболее эффективных нагревов (высокочастотного — ВЧ) контролируются по показателям работы генератора. Сложность управления данным ТП состоит в том, что продолжительность обработки часто не превышает нескольких секунд, а обрабатываемые материалы имеют незначительный интервал температурного перехода из вязкотекучего в деструктивное состояние. Ручное управление операциями становится неэффективным. Анализ современного состояния проблемы [1, 2] показал, что исследованиям по данной тематике с целью практического использования уделяется весьма незначительное внимание, а процент брака в технологии ВЧ-обработки достигает 18% [2, 3].

Поэтому повышение качества термообработки и повторяемость ее результатов требует наличия автоматизированного регулирования параметров процесса высокочастотной обработки. Организация такой системы является актуальной задачей и возможна при наличии научно-обоснованных методик выбора наиболее информативных и обработанных сигналов, работы ВЧ-оборудования.

Таким образом, актуальной задачей является создание систем (устройств) сбора и обработки параметрических данных работы ВЧ электротермического оборудования с целью организации процесса его автоматизированного управления.

Описание исследования и полученные результаты

Снижение энергетических затрат и времени ВЧ-обработки достигается режимами работы с максимальной мощностью (напряжением на обкладках рабочего конденсатора).

Для обеспечения высокого термического КПД процесс ВЧ-воздействия необходимо вести с максимальной интенсивностью при максимально возможной напряженности поля $E_p = E_{дон}$ в материале или при $U_p = U_{дон}$.

Максимально возможное при высокочастотной обработке напряжение на рабочем конденсаторе $U_{дон}$ и соответственно максимальная напряженность поля в материале $E_{дон}$ ограничены не только пробивной напряженностью термопласта (которая весьма значительна), но и пробивной напряженностью в воздушной прослойке между электродами рабочего конденсатора, которая всегда присутствует в реальной технологической оснастке, а также в порах, трещинах, расслоениях материала, наличия в воздухе различного рода примесей и др. Допустимая напряженность поля в воздушном зазоре E_a (сухой воздух) на частотах 10...40 МГц не должна превышать 8...10 кВ/см [4, 5]. В работе [4] рекомендуется выбирать рабочую напряженность поля в термопласте в пределах 1,5...30 кВ/см. Столь широкие пределы изменения рабочей напряженности поля обусловлены различиями в толщине, качестве, наличии включений и другими особенностями термопластов.

Определение напряженности электрического поля в материале (в данном случае в полиамиде и в воздушной прослойке) показало, что, несмотря на изменение диэлектрической проницаемости полимера (с ростом температуры растет напряженность поля в материале), напряженность в полиамиде будет оставаться приблизительно постоянной. В то же время с ростом диэлектрической проницаемости воздуха напряженность поля в воздушной прослойке за счет включений и загрязнений будет увеличиваться, что приводит к возникновению микропробоев на поверхности материалов так называемых частичных разрядов (ЧР). Определить допустимую рабочую напряженность поля в материале расчетным путем не представляется возможным, так как не известна величина напряженности. Последняя может быть найдена экспериментально по динамике возникновения микропробоев.

Таким образом, в рамках настоящего исследования впервые в качестве показателя наиболее эффективного режима работы электротермического оборудования при организации АСУТП были определены сигналы от частичных разрядов, возникающих в процессе термообработки.

Следующим этапом исследований был выбор сигналов, характеризующих процесс диэлектрического на-

грева в его динамике. Прямое измерение температуры обрабатываемого изделия не представляется возможным, так как мощное электрическое поле в рабочем конденсаторе оказывает возмущающее воздействие. Более того, контакт массивных и различных по геометрии обкладок конденсатора (электродов) с деталью создает градиент температур, который сложно поддается расчету, особенно у изделий сложной конструкции. Идея контроля термического ВЧ-воздействия на полимеры по параметрам работы генератора была заимствована в [2, 6]. В этих работах определена возможность расчета температуры в зоне обработки по напряжению на обкладках рабочего конденсатора и анодному току работы ВЧ-генератора. Недостаток данной методики состоит в том, что она применима только к изделиям, имеющим одинаковые электрофизические, химические и геометрические параметры.

Поэтому была выдвинута гипотеза, что в качестве показателей температурного воздействия можно использовать характерные и показательные изменения электрофизических параметров полимеров при их фазовых и агрегатных превращениях.

Объяснение физических процессов, происходящих в полимерных материалах при изменении их диэлектрических показателей, было найдено в работе [6], где для определения тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ полимерного материала через мгновенные электрические параметры режима работы генератора — ток I_{ao} и напряжение U_p на рабочем конденсаторе была получена соответствующая зависимость.

Исследования данной зависимости на установках промышленного типа, работающих в недонапряженных режимах работы генератора (при постоянных значениях напряжения на рабочем конденсаторе и угловой частоты) подтвердили выдвинутую ранее гипотезу и показали, что состояние в процессе ВЧ-воздействия обрабатываемого полимерного материала определяется его электрофизическим параметром $\operatorname{tg} \delta$ по анодному току I_{ao} .

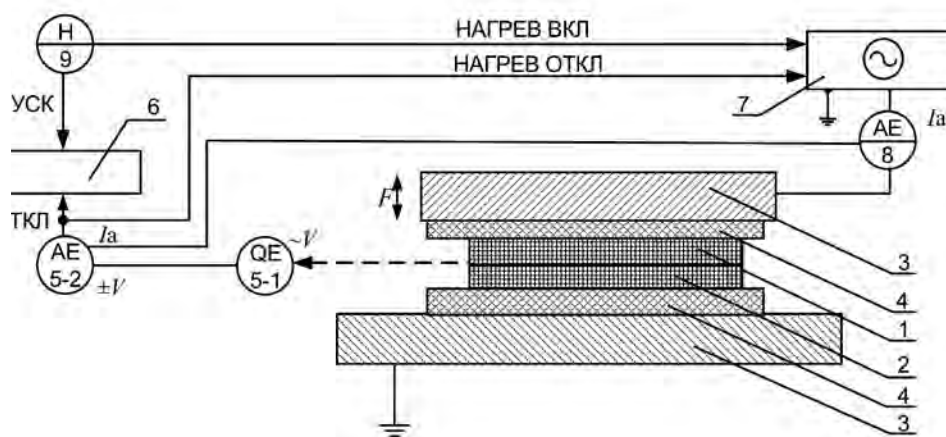


Рис. 1. Технологическая схема экспериментальной установки высокочастотной обработки полимерных материалов, где: 1 – изделие; 2 – изделие; 3 – электроды рабочего конденсатора; 4 – изоляционный вкладыш; 5-1 – электромагнитный датчик; 5-2 – аналогово-цифровой преобразователь (АЦП); 6 – вычислительное устройство; 7 – высокочастотный генератор; 8 – датчик анодного тока; 9 – кнопка "ПУСК"

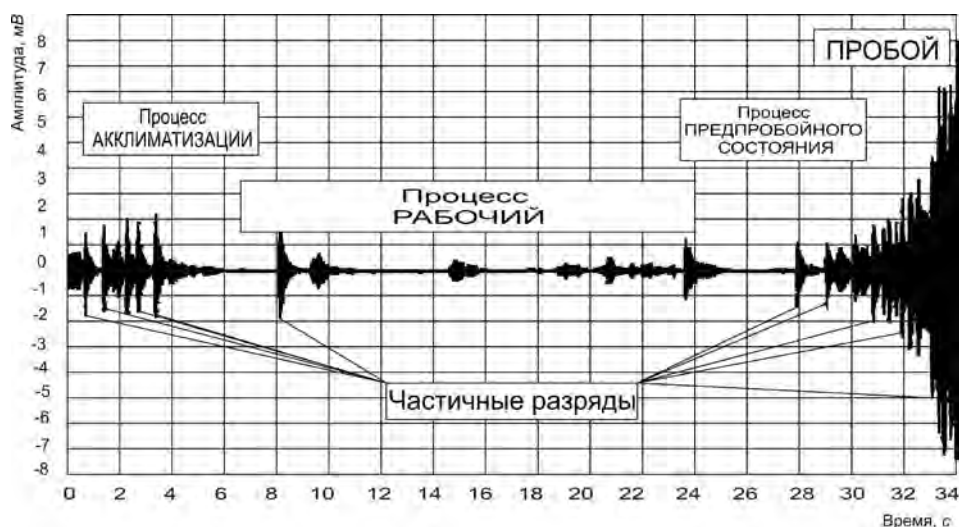


Рис. 2. Фонограмма динамики частичных разрядов

Экспериментальные исследования проводились на установке ВЧ-обработки, собранной на базе оборудования электротермического нагрева модели УЗП-2500. Технологическая схема экспериментальной установки высокочастотной обработки полимерных материалов представлена на рис. 1

В момент появления частичного разряда в полимере возникает короткий импульсный электромагнитный сигнал, сопровождающийся звуковой волной. Поэтому для регистрации ЧР было принято решение применить звуколокационный метод с использованием акустических датчиков. Данная методика позволяет определять координаты объекта по двум датчикам, разнесенным между собой на угол более 30 гр.

Фонограмма экспериментальных исследований по динамике частичных разрядов на примере полиамида ПА-66 показана на рис. 2.

Обработка результатов измерений выполнялась по следующему алгоритму.

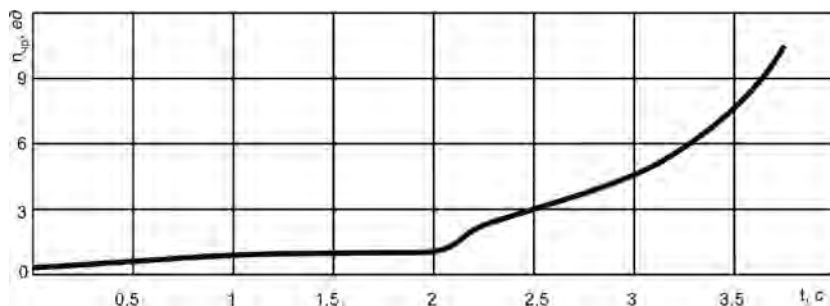


Рис. 3. Динамика частичных разрядов предпробойного состояния

Определение соответствующих средних значений времени $\tau_{чр.к}$ ЧР:

$$\tau_{чр.к} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tau_{чр.i}, \quad (1)$$

где k — номер образца обработки, $k = 1; 2; \dots$; $\tau_{чр}$ — время возникновения ЧР; N — число использованных образцов.

Значение N устанавливается с учетом условий: $\delta\tau_{чр.ij} < 10\%$, где: $\delta\tau_{чр.ij}$ — различие между временем возникновения ЧР в образцах, обработанных на одном режиме; $i, j = 1; 2; 3$ — номера образцов.

Различие между временем возникновения ЧР в образцах определяется по формуле:

$$\delta\tau_{чр.ij} = \frac{\tau_i^b - \tau_j^m}{\tau_j^m} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где: τ^b, τ^m — большее и меньшее из сравниваемых значений времени возникновения ЧР.

Так, например, при выполнении условий (2) для всех сочетаний: $\delta\tau_{чр.12}; \delta\tau_{чр.23}; \delta\tau_{чр.13}$ принимаем $N_{обр} = 3$.

Если время возникновения ЧР одного из образцов отличается от остальных двух более чем на 10%, то среднее значение определяется по двум оставшимся, то есть $N_{обр} = 2$.

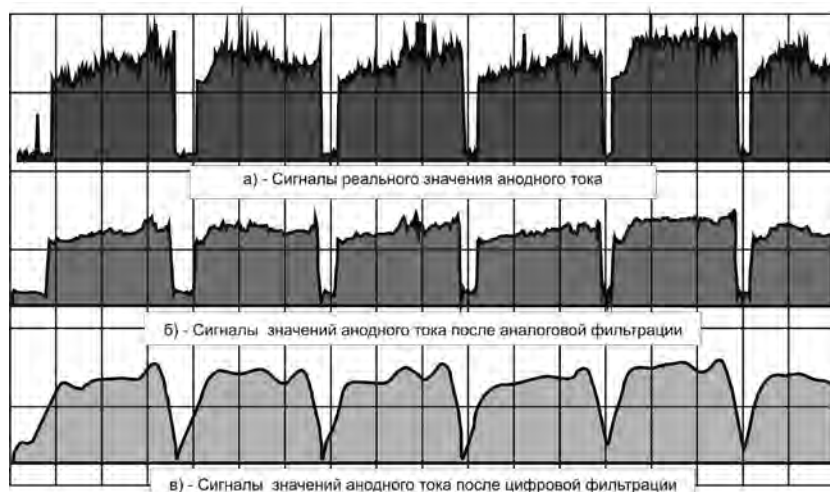


Рис. 4. Комплексный график полученных: а) и отфильтрованных б), в) значений анодного тока работы ВЧ-генератора электротермического оборудования модели УЗП-2500

После выделения данных по возникновению ЧР процесса предпробойного состояния была получена характерная кривая, представленная на рис. 3.

В ходе экспериментальных исследований было впервые отмечено снижение начальной активности ЧР при повторном помещении изделия в ВЧ поле. Объясняется это следующим: изменения, вызванные ВЧ-воздействием, меняют поверхностную структуру полимеров, происходит

оплавление воздушных раковин, пор, выгорание посторонних включений и т.д. То есть на начальном этапе обработки происходит «акклиматизация» полимерного материала к ВЧ-воздействию. Поэтому ЧР на этом этапе обработки (несмотря на некоторое негативное влияние) оказывает улучшающее воздействие. Этот факт был взят за основу при организации управления процессом электротермии полимерных материалов на первом этапе обработки. Экспериментальные исследования показывают, что время активного проявления начальных ЧР зависит от множества сложно контролируемых показателей обрабатываемого материала. В отдельных случаях на начальном этапе обработки развитие разрядов зависит от мощности воздействия, что может привести к шунтирующим пробоям.

Экспериментальным исследованиям показателей анодного тока работы ВЧ-генератора предшествовала подготовительная работа по выбору методов фильтрации сигнала. Был рассчитан и реализован аналоговый фильтр. Однако выявленные недостатки работы аналогового фильтра обосновали необходимость создания цифрового фильтра с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтр) [7, 8].

Реализация разработанного фильтра велась на языке C++ для программ микроконтроллеров семейства Arduino. На данный программный продукт фильтрации значений сигналов анодного тока высокочастотного генератора электротермической установки методом скользящей средней было получено свидетельство Государственной регистрации программ для ЭВМ № 2013661820. Программа успешно реализует алгоритм решения, методом скользящей средней с нормированием весовых коэффициентов. Отфильтрованные воздействием высокочастотного излучения и других помех, сигналы значений анодного тока в дальнейшем направляются в аналогово-цифровой преобразователь автоматизированной системы контроля

и управления электротермическим оборудованием.

Особенностью, разработанного фильтра, стало использование достаточно низкой частоты среза, позволяющей добиться требуемого качества сигналов с незначительным математическим их искажением (рис. 4 в).

Полученные с помощью описанной методики, амперометрические зависимости фазовых превращений $I_a(T)$ приведены на рис. 5.

Анализ данных показывает, что изменение фазового состояния образцов (начало плавления) соответствует первому минимуму значений анодного тока. Максимальному значению анодного тока соответствует температура полимера, равная примерно $85 \dots 91\% T_{пл}$. Максимум дипольных потерь связан с подвижностью полярных групп (фазовое состояние) и приблизительно согласуется с результатами, приведенными в [9, 10].

Таким образом, в рамках настоящего исследования были теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены выбранные контролируемые параметры работы электротермического оборудования. Впервые была доказана возможность контроля фазовых и агрегатных превращений в полимерных материалах в процессе их электротермической обработки по динамике анодного тока ВЧ-генератора. Впервые для электротермии была доказана возможность использования частичных разрядов и их динамики для контроля этапов (процессов) обработки.

Апробация разработанных методик использования данных о частичных разрядах и экстремумов анодного тока производилась на предприятии полиграфической отрасли при организации АСУ ТП электротермического оборудования модели УЗП-2500 при сваривании изделий из пленки ПВХ. Результатом стало снижение более чем на 8% брака при производстве изделий по причине прогара свариваемого материала и электродов.

Практическая значимость

Преимуществом разработанной методики выбора и обработки сигналов работы электротермического оборудования стала простота ее интеграции в существующие системы контроля и управления ТП (без изменения ее электрических, кинематических и др. цепей управления).

Использование АСУ позволило усовершенствовать существующие технологические процессы и внедрить, с использованием сложных электродов новые: сварка

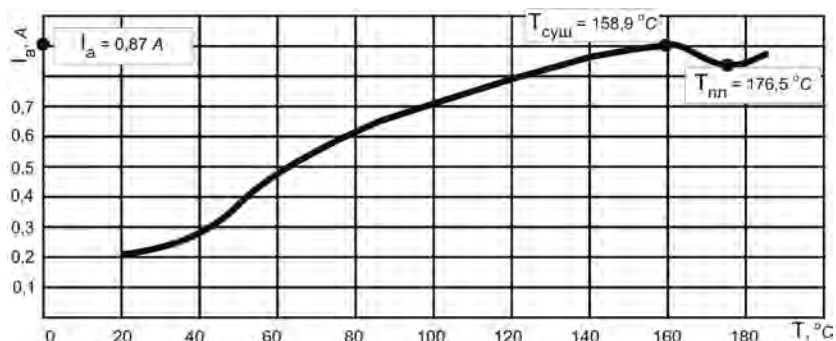


Рис. 5. Амперометрическая зависимость фазового превращения ПВХ

ПВХ, бумвинила, коленкора, тиснение высокотемпературной полиграфической фольгой и конгревное тиснение.

Годовой экономический эффект от внедрения АСУТП высокочастотной обработки полимерных материалов только на «Иркутском полиграфическом предприятии» составил более 800 тыс. руб.

Список литературы

1. Филиппенко Н. Г., Лившиц А. В., Машович А. Я. Автоматизация процесса высокочастотного нагрева материалов на промышленной установке УЗП 2500 // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. Вып. 2 (30). Иркутск. 2011. С.193-198.
2. Донской А.В., Рамм Г.С., Вигдорович Ю.Б. Электротермические установки с ламповыми генераторами Л.: Энергия, 1974. 208 с.
3. Калганова С. Г. Измерения в СВЧ электротехнологии // Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2004: труды VII Междунар. науч.-техн. конф. Новосибирск, 2004. С. 58-60.
4. Калганова С.Г. Модификация свойств полимеров при тепловом воздействии СВЧ электромагнитных колебаний. Композит 2004. Перспективные полимерные композиционные материалы. Альтернативные технологии. Переработка. Применение. Экология. // Докл. Междун. конф. Саратов, 2004. С. 309-312.
5. Фейнман Р. Энергия поля и его импульс. Плотность энергии и поток энергии в электромагнитном поле Лекции по физике. Вып. 4. М.: Мир, 1965. 286с.
6. Марков А. В. Многофункциональный контроль параметров технологического процесса в электротермической установке высокочастотного диэлектрического нагрева // Электротехника. 2007. № 7. С. 60-64.
7. Опенгейм А.В., Шафер Р.В. Цифровая обработка сигналов: Пер. с англ./Под ред. С. Я. Шаца. — М.: Связь, 1979
8. Haykin, Simon. [1991]. Adaptive Filter Theory, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
9. Сажин Б.И., Лобанов А.М., Романовская О.С. и др. Электрические свойства полимеров. Л.: Химия, 1986. 224 с.
10. Макаров В.Г. Промышленные термопласты // Справочник. М.: Химия; М.: Колосс, 2003. 204 с.

Филиппенко Николай Григорьевич — доцент каф. ТРТСиМ Иркутского государственного университета путей сообщения.

Контактный телефон (3952) 63-83-99 (доп. 02-70).

E-mail: ifpi@mail.ru