

## **ЭФФЕКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫМ ГРАДИЕНТОМ ТЕМПЕРАТУРЫ АМПУЛ ПРИ ВОСПРОИЗВЕДЕНИИ РЕПЕРНЫХ ТОЧЕК ТЕМПЕРАТУРЫ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ МЕТАЛЛОВ**

Горбылев А.А., Гривастов Д.А.  
ФГУП «СНИИМ»

В процессе длительной эксплуатации ампул реперных точек вторичного эталона ФГУП «СНИИМ», выполненных в кварцевом чехле, обнаружилась необходимость более эффективного контроля и поддержания минимального градиента температуры по высоте ампул. Известно, что значение этого градиента влияет на длительность площадки затвердевания. В связи с этим при реализации реперных точек разность температуры в зоне размещения ампулы стремятся уменьшить. Достаточно большой градиент может также привести к разрушению кварцевого чехла. Если в процессе плавления и затвердевания металла градиент по высоте ампулы склонен к самостоятельному уменьшению, то в процессе нагрева и охлаждения ампулы контроль и поддержание градиента является задачей аппаратуры управления воспроизведением.

В соответствии с рекомендациями МТШ-90, реперные точки температуры затвердевания металлов чаще всего реализуются в трёхзонной печи. Для обеспечения возможности эффективного контроля и регулирования градиента температуры в ФГУП «СНИИМ» проведены научно-исследовательские работы. В их результате разработана арматура для ампул реперных точек, выполненных в кварцевом чехле, имеющая интегрированные датчики температуры на уровне верхнего и нижнего торцов ампулы, а также алгоритм управления и аппаратура для его реализации.

Созданный программно-аппаратный комплекс для реализации реперных точек температурной шкалы в диапазоне температуры от 156 °С (точка затвердевания индия) до 660 °С (точка затвердевания алюминия) включает в себя адаптивный ПИД-регулятор, который при управлении нагревателями трёхзонной печи учитывает градиент температуры по высоте ампулы.

Вычисление коэффициентов ПИД-регулятора происходит автоматически в процессе нагрева. Алгоритм построен таким образом, чтобы минимизировать градиент температуры по высоте ампулы на всех этапах реализации реперной точки: нагрев, плавление, перегрев, охлаждение после перегрева, затвердевание, охлаждение при завершении работы с ампулой. Регулирование температуры на нагревателях проходит следующим образом: выходная мощность центрального нагревателя вычисляется по ПИД-закону регулирования, а температура уставки верхнего и нижнего нагревателя динамически задаётся в зависимости от градиента температуры.

Применение описанных технологий позволяет обеспечить целостность кварцевого чехла ампулы в процессе эксплуатации, а также значительно увеличить длительность воспроизведения площадки затвердевания реперных точек.

С начала 2009 г в ФГУП «СНИИМ» проводится модернизация государственных вторичных эталонов температуры ВЭТ 34-27-99 и ВЭТ 34-22-89, с целью повышения точности и воспроизводимости при передаче единицы температуры. Одной из составляющих модернизации является переход к новым ампулам реперных точек затвердевания цинка (419,527 °С) и алюминия (660,323 °С) в герметичном кварцевом чехле.

В рамках этих мероприятий, помимо прочего, для эталона ВЭТ 34-27-99 были приобретены новые ампулы реперных точек затвердевания цинка и алюминия.

Опыт использования подобной ампулы (реперной точки затвердевания алюминия) в течение предыдущих шести лет показал её сравнительно низкую конструктивную надёжность при эксплуатации в существующих установках для воспроизведения реперных точек ВЭТ 34-27-99. За это время в процессе эксплуатации дважды происходило разрушение кварцевой капсулы.

Изучение обстоятельств, при которых происходило разрушение капсулы, позволяет сделать вывод о том, что основной причиной разрушения стал существенный градиент температуры по высоте ампулы реперной точки. Если в процессе плавления и затвердевания металла величина этого градиента по высоте ампулы в силу происходящих физических процессов естественным образом выравнивается, то в процессе достижения заданной температуры градиент может быть достаточно велик.

Для реализации возможности воспроизведения реперных точек затвердевания металлов в режимах, обеспечивающих малый градиент температуры по высоте ампулы на

всех стадиях процесса воспроизведения, принимая во внимание физическую изношенность печей и другой аппаратуры установок для воспроизведения реперных точек ВЭТ 34-27-99, было принято решение изготовить совершенно новые установки.

В результате проведённых в ФГУП «СНИИМ» научно-исследовательских работ был разработан новый аппаратно-программный комплекс для воспроизведения реперных точек температуры затвердевания металлов. В состав этого комплекса вошла арматура для ампул реперных точек, выполненных в кварцевом чехле, имеющая интегрированные датчики температуры на уровне верхнего и нижнего торцов ампулы.

Аппаратная часть комплекса включает в себя трёхзонную печь, шесть термопреобразователей, измеритель температуры многоканальный прецизионный «Термоизмеритель ТМ-12», компьютер, ЦАП и блок усилителей мощности.

Благодаря развитию информационных технологий возможно не только полностью автоматизировать и визуализировать процесс воспроизведения реперных точек, но и сделать это удобным нам способом.

В процессе модернизации вторичного эталона программное обеспечение усложнялось и развивалось, со временем приобретая черты небольшой SCADA-системы. Например, первоначально программный регулятор представлял из себя простейший двухпозиционный одноканальный регулятор, сейчас же в нём используется адаптивный многоступенчатый ПИД-регулятор.

Программная часть комплекса построена по принципу клиент-серверной архитектуры, она состоит из драйвера термоизмерителя, драйвера ЦАП, сервера обмена данными, программного регулятора и графического интерфейса.

При разработке программного обеспечения ставились следующие задачи:

- обеспечение малого градиента температуры по высоте ампулы на всех этапах реализации реперной точки (нагрев, плавление, перегрев, площадка затвердевания);
- организация дружественного интерфейса пользователя;
- масштабируемость системы с возможностью расширения;
- независимость от аппаратного обеспечения.

Разработанный программный комплекс успешно справляется с этими задачами. При этом система, с одной стороны, одна и та же для всех реперных точек, с другой стороны, учитывает особенности каждой.

Центральной частью программного комплекса является регулятор, который обрабатывает полученные данные о температуре и вычисляет выходную мощность для каждого из нагревателей. В основе алгоритма вычисления выходного воздействия лежит базовый принцип пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора, который был реализован с учётом особенностей управления трёхзонной печью.

Каждую секунду программный регулятор запрашивает у сервера актуальную на текущий момент времени информацию. Эта информация включает в себя данные о температуре с пяти датчиков (температура контрольного датчика не учитывается при вычислениях).

Перед регулятором постоянно стоят две задачи – удерживать градиент температуры по высоте ампулы максимально низким; достичь и удерживать среднюю температуру нагревателей на уровне уставки. Обе задачи решаются параллельно.

Необходимо учитывать, что есть возможность непосредственно контролировать только мощность нагревателей. При этом нет прямой зависимости между мощностью нагревателей и градиентом температуры по высоте ампулы, но можно чётко проследить зависимость между температурой нагревателей и градиентом температуры. Поэтому регулирование осуществляется в два этапа – сначала, исходя из текущей уставки температуры, а также принимая во внимание градиент температуры по высоте ампулы, вычисляются три локальных уставки для каждого из нагревателей, а уже для достижения этих локальных уставок вычисляется выходная мощность для каждого из нагревателей.

Таким образом, воздействие, которое необходимо приложить для выравнивания градиента, пропорционально разности локальных уставок верхнего и нижнего нагревателей. Локальная уставка среднего нагревателя принимает значение среднего арифметического локальных уставок верхнего и нижнего нагревателей. Это воздействие вычисляется по закону ПИД-регулирования, где в качестве ошибки выступает модуль разности температур верхнего и нижнего концов ампулы.

$$D = K_{dp} \cdot gr + K_{di} \cdot \int_{T_{int}} gr \cdot dt + K_{dd} \cdot \frac{dgr(t)}{dt_{Tdif}} \quad (1)$$

Здесь  $gr$  – модуль значения градиента температуры по высоте ампулы;

$T_{int}$  – время интегрирования;

$T_{dif}$  – время дифференцирования;

$K_{dp}$ ,  $K_{di}$ ,  $K_{dd}$  – коэффициенты регулирования воздействия на градиент.

Коэффициенты регулирования для этой формулы эмпирически вычисляются один раз для каждой печи. Определить эти коэффициенты автоматически возможно, но наши исследования в данном направлении ещё не закончены и в системе управления данная функция пока не реализована.

Если текущее значение градиента температуры, либо скорость его изменения, незначительны (т.е. меньше двойного значения погрешности измерения температуры), то локальные уставки принимают такие значения, чтобы их среднее арифметическое было равно номинальной уставке. Локальные уставки не всегда приравниваются друг к другу, это зависит от конкретного оборудования, а именно печи. Иногда получается так, что вертикальный тепловой поток внутри жаровой трубы печи распределяется неравномерно, в связи с этим одинаковая температура нагревателей оказывает разное воздействие на градиент температуры по высоте ампулы. Для выравнивания градиента локальные уставки устанавливаются с некоторой разницей (назовём эту разницу рассогласованием), которая, как и коэффициенты регулирования для формулы 1, вычисляется эмпирическим путём один раз для каждой печи. К сожалению, автоматическое определение этого рассогласования в системе управления пока не реализовано. Тем не менее, даже при неизвестном значении этого рассогласования существующий алгоритм будет выравнивать градиент эффективно, но процесс реализации займёт больше времени.

Если текущее значение градиента температуры, либо скорость его изменения, превышают двойное значение погрешности измерения, то локальная уставка ближайшего к холодному концу ампулы нагревателя приравнивается к номинальной уставке (с учётом рассогласования, описанного выше). Локальная уставка противоположного нагревателя вычисляется с учётом вычисленного по формуле 1 воздействия, по формуле, общий вид которой приведен ниже:

$$U_h = T_c - D + \frac{Q}{2} \quad (2)$$

Здесь  $U_h$  – локальная уставка ближайшего к горячему концу ампулы нагревателя;

$T_c$  – температура ближайшего к холодному концу ампулы нагревателя;

$D$  – вычисленное по формуле 1 воздействие;

$Q$  – рассогласование теплового потока внутри жаровой трубы;

Таким образом алгоритм выполняет сразу две задачи одновременно – температура нагревателей постоянно смещается в сторону номинальной уставки, и в то же время постоянно контролируется вертикальный градиент по высоте ампулы.

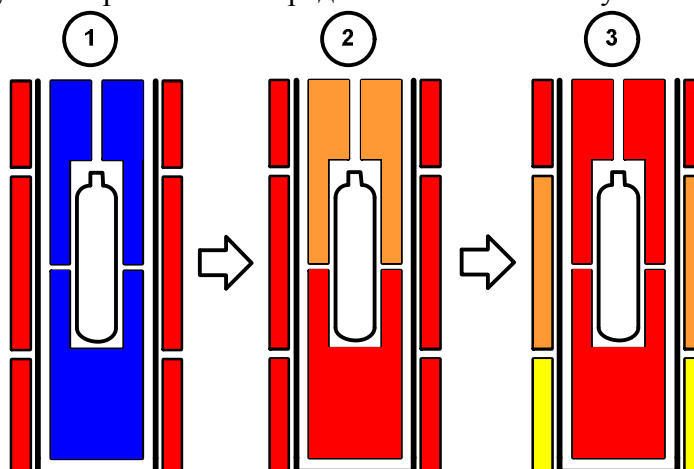


Рисунок 1. Процесс выравнивания градиента.

На рисунке 1 визуально отображен процесс выравнивания градиента (синий цвет – низкая температура, красный – высокая). На этом рисунке в позиции ① изображено начало процесса нагрева, температура нагревателей одинаковая, градиент по высоте ампулы незначителен; в позиции ② - одинаковая температура нагревателей оказывает различное воздействие на температуру верхнего и нижнего концов ампулы; в позиции ③ – температура нагревателей меняется, градиент температуры по высоте ампулы выравнивается.

Мощность, подаваемая на каждый из нагревателей, также вычисляется по закону ПИД-регулирования

$$P = K_p \cdot e + \frac{1}{K_i} \cdot \int_{T_{int}} e \cdot dt + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt_{T_{dif}}} \quad (3)$$

Здесь  $P$  – мощность;

$e$  – ошибка, вычисляемая как разность между температурой нагревателя и уставкой;

$K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  – пропорциональный, интегральный и дифференциальный коэффициенты соответственно.

Коэффициенты, а также время интегрирования и дифференцирования для каждого из нагревателей индивидуальны и вычисляются автоматически в начале процесса реализации. Сложность задачи определения коэффициентов заключается в том, что градиент температуры по высоте ампулы необходимо поддерживать минимальным даже при неизвестных коэффициентах ПИД-регулирования нагревателей. Но эта задача была успешно решена и алгоритм программно реализован и функционирует.

Чтобы избежать перегрева и увеличения градиента температуры, участок нагрева до значения номинальной уставки разбивается на три этапа.

На первом этапе локальные уставки нагревателей приравниваются к одной третьей величине номинальной уставки. Мощность всех нагревателей задаётся на одинаковом уровне, равном половине максимальной мощности. В каждом цикле измерений определяется мгновенное значение коэффициента передачи по формуле:

$$K_{pt} = \frac{(T_i - T_{i-1})}{t \cdot P_{i-1}} \quad (4)$$

Здесь  $T_i$  – текущая температура нагревателя;

$T_{i-1}$  – температура нагревателя на предыдущем цикле измерений;

$t$  – время измерений;

$P_{i-1}$  – мощность на предыдущем цикле измерений;

Исходя из этого коэффициента для каждого из нагревателей вычисляется ориентировочное время выхода на локальную уставку (без учёта инерционности):

$$t_w = \frac{(U - T_i) \cdot P_{i-1}}{K_{pt}} \quad (5)$$

Здесь  $U$  – локальная уставка нагревателя;

Как только до выхода на локальную уставку остаётся меньше 30 секунд, последнее значение мгновенного коэффициента передачи запоминается, и мощность подаётся согласно закону пропорционального регулятора. Таким образом нагреватель, который достиг локальной уставки быстрее всех, как бы «ожидает» остальные нагреватели.

Как правило, на первом этапе увеличением градиента температуры по высоте ампулы можно пренебречь, т.к. оно незначительно, но в случае увеличения градиента, он выравнивается путём уменьшения подаваемой мощности на ближайший к горячему концу ампулы нагреватель. Если же этот нагреватель уже достиг локальной уставки, то она уменьшается согласно алгоритму, описанному выше.

Когда все три нагревателя достигли своих локальных уставок, начинается второй этап. На этом этапе локальные уставки приравниваются к двум третьим величины номинальной уставки, с учётом градиента температуры по высоте ампулы.

На этом этапе на все нагреватели мощность подаётся таким образом, чтобы все они достигли своих локальных уставок одновременно, в остальном второй этап аналогичен первому. В конце второго этапа новые вычисленные значение мгновенного коэффициента передачи запоминаются.

На третьем этапе локальные уставки приравниваются к значению номинальной уставки, уменьшенному на 15 процентов, с учетом рассогласования. На каждом цикле измерений вычисляется ориентировочное время выхода нагревателя на локальную уставку. Как только до выхода на локальную уставку остается меньше минуты, запоминаются текущие значения температуры и времени, и через минуту вычисляется переходная характеристика, которая ляжет в основу вычисления коэффициентов ПИД-регулирования для данного нагревателя.

После вычисления переходной характеристики мощность на данном нагревателе отключается, и запоминаются текущие значения температуры и времени. Как только температура на данном нагревателе перестает увеличиваться, вычисляется инерционность данного нагревателя по формуле:

$$I = t - t_s \quad (6)$$

Здесь  $t$  – текущее время;

$t_s$  – время, когда мощность нагревателя была отключена.

На основе данных о коэффициенте передачи и инерционности вычисляются коэффициенты ПИД-регулирования по следующим формулам:

$$K_p = 0,6 \cdot K_{pt}; K_i = \frac{I}{2}; K_d = \frac{I}{8}$$

Если в процессе работы выясняется, что коэффициенты вычислены недостаточно точно (если максимальное отклонение от локальной уставки при установившемся режиме

превышает двойное значение погрешности измерения температуры), то оператор может подстроить коэффициенты вручную через графический интерфейс.

После вычисления коэффициентов, подаваемая мощность вычисляется по формуле 3. Как только коэффициенты будут вычислены для всех нагревателей, значения локальных уставок вычисляются по алгоритму, изложенному выше.

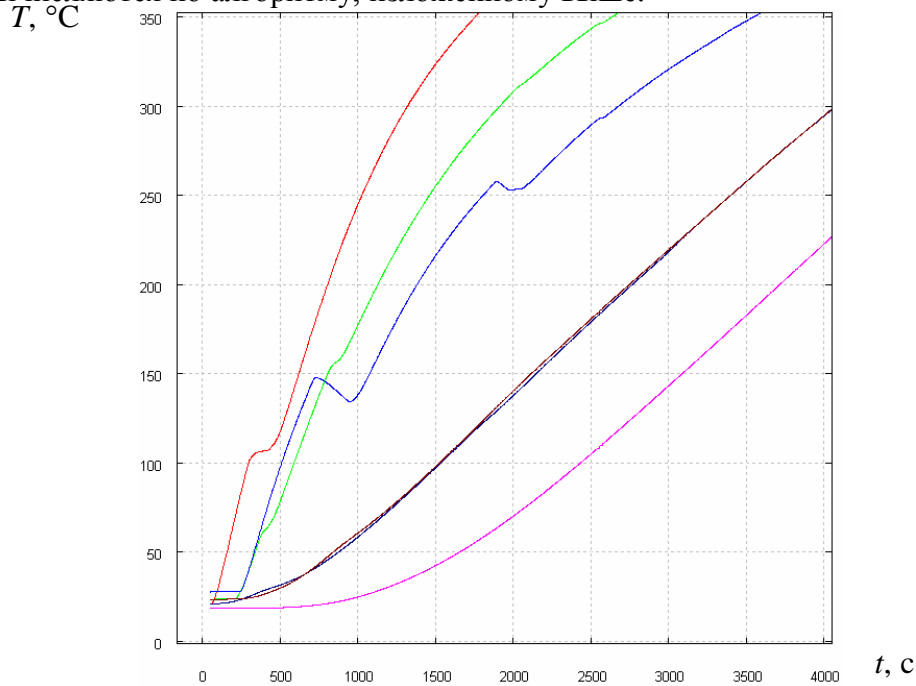


Рисунок 2. График начала процесса воспроизведения реперной точки затвердевания цинка

Описанный алгоритм позволяет эффективно управлять вертикальным градиентом температуры по высоте ампулы на всех этапах процесса воспроизведения реперных точек температуры затвердевания металлов.

На рисунке 2 изображен график начала процесса воспроизведения реперной точки затвердевания цинка. Здесь три верхние кривые – это температура верхнего, среднего и нижнего нагревателей соответственно, самая нижняя кривая – это температура контрольного датчика, и две средние сливающиеся кривые – это температура верхнего и нижнего концов ампулы.

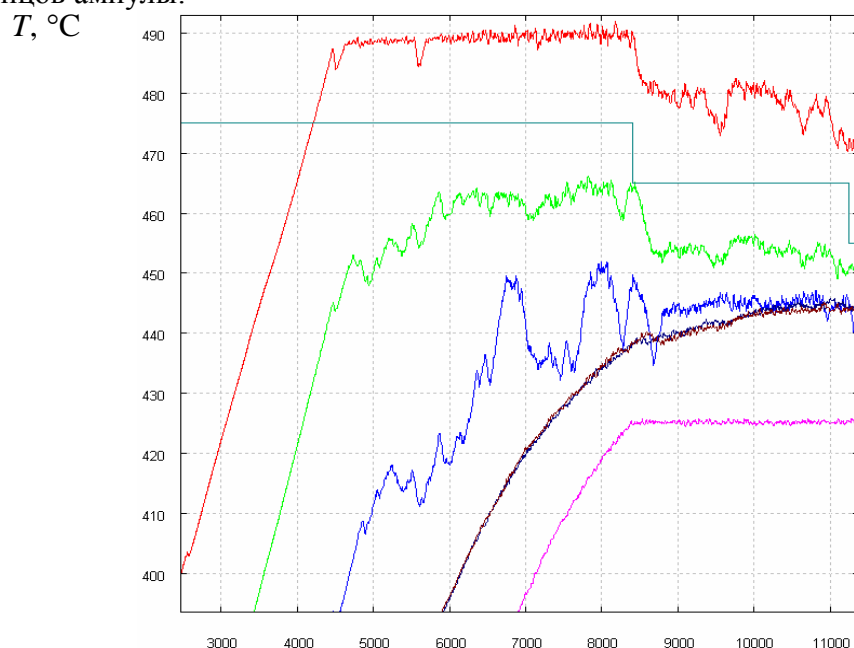


Рисунок 3. График начала плавления.

$t, c$

На рисунке 3 изображен процесс плавления при воспроизведении реперной точки затвердевания цинка. Дополнительной ступенчатой линией на этом рисунке показаны значения номинальной уставки температуры, значение остальных линий аналогично изображенным на рисунке 2.

В итоге график температуры внутри ампулы до выхода на режим затвердевания выглядит так, показано на рисунке 4.

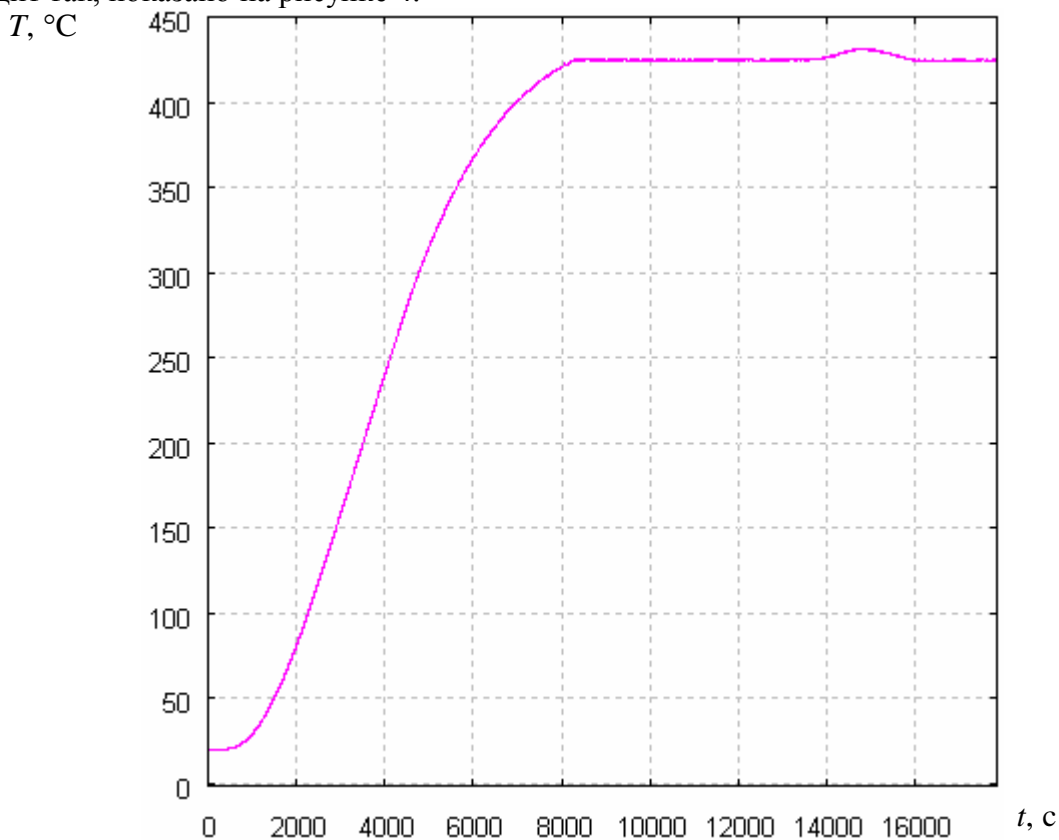


Рисунок 4. График температуры внутри ампулы до выхода на режим затвердевания.

Использование модернизированных установок для воспроизведения реперных точек температуры решило проблему сохранности кварцевых чехлов ампул с чистыми металлами и, кроме того, позволило значительно увеличить длительность площадок затвердевания. В настоящее время ведётся продолжение работ в данном направлении с целью добавления в алгоритм регулирования возможности автоматического оперативного определения начальных условий, а также совершенствования конструкции печей и вспомогательной аппаратуры.