

УДК 681.5

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО НАГРЕВА И ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДИСКОВ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

© 2021 г. П. Б. Римша^{1,*}, А. О. Толоконский^{1,**}

¹ Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409, Россия

*e-mail: paulickche@gmail.com

**e-mail: toloconne@yandex.ru

Поступила в редакцию 29.12.2021 г.

После доработки 30.12.2021 г.

Принята к публикации 30.12.2021 г.

Газотурбинные двигатели (ГТД) – сложное устройство, преобразующее воздух и топливо в газоздушную смесь, идущую на создание реактивной тяги. Детали ГТД претерпевают повышенные нагрузки, в частности температурные. Для изготовления деталей применяют высокопрочные материалы, для деталей, работающих при высоких температурах – класс жаропрочных сплавов на основе никеля. Диски турбин ГТД с рабочими температурами до 800°C, являются одними из самых высоконагруженных деталей. К дисковым жаропрочным сплавам и их процессу изготовления, в том числе, термической обработке, предъявляются высокие требования. Необходимо четко соблюдать технологические параметры режима термической обработки, в том числе – температуру термообработки и скорость охлаждения полуфабрикатов. Статья посвящена разработке программного обеспечения системы управления по заданному режиму изменяемого термопрофиля. Приведены сведения о структуре системы, ее организации, этапах разработки и отладки. Разработаны алгоритмы управления нагрева муфельной печи и установки охлаждения. Разработанная программа позволяет провести термическую обработку штамповки диска газотурбинного двигателя по заранее подобранному режиму. Это позволяет получить необходимую структуру деформируемого жаропрочного сплава на никелевой основе, что в свою очередь существенно увеличивает характеристики эксплуатационных свойств.

Ключевые слова: система контроля температуры, технологический процесс, термическая обработка, квазилинейные уравнения

DOI: 10.1134/S2304487X21050084

ВВЕДЕНИЕ

Одним из главных преимуществ АСУ является снижение, вплоть до полного исключения, влияния “человеческого фактора” на управляемый процесс, сокращение персонала, минимизация расходов сырья, повышение качества исходного продукта, и в конечном итоге существенное повышение эффективности производства. Основные функции данных систем включают в себя контроль и управление, обмен данными, обработку, накопление и хранение информации, формирование аварийных сигналов, построение графиков и создание отчетов.

Автоматизированная система осуществляется при активном участии оператора в диспетчерском контроле и управлении, при этом посредством ЭВМ выполняется часть операций.

Супервизорное управление осуществляется при работе контура локальной автоматики, но через ЭВМ выбираются установки.

В нашем конкретном случае будет применяться прямое цифровое управление. Объектом управления является муфельная печь и установка охлаждения штамповок дисков ГТД.

Диски турбин ГТД – это детали, требующие особого к ним отношения, так как они являются одними из самых высоконагруженных деталей, от ресурса работы которых зависит жизнеспособность двигателя в целом. Дисковые материалы изготавливают из деформируемых жаропрочных никелевых сплавов. Они являются структурно чувствительными. Оценка структуры проводят по размеру зерна основной упрочняющей фазы никелевых сплавов (γ -фазы), применяя балльную систему. Один из способов управления структурой – термическая обработка, позволяющая по-

лучить требуемый размер зерна и, впоследствии существенно повлиять на эксплуатационные характеристики материала, а значит, и диска [1–4]. Надо отметить, что одним из этапов термической обработки является так называемая закалка – это нагрев до определенной температуры (температура закалки), выдержка в течение заданного времени и охлаждение с заданной скоростью. В данном случае важнейшими показателями являются температура закалки и скорость охлаждения. Отклонение от требуемого значения температуры закалки может быть чревато. Например, превышение температуры на 3°C ведет к увеличению зерна на один бал, поэтому нагрев и выдержка в течение заданного времени должны проходить с прецизионным поддержанием значения температуры в рабочем пространстве печи. Если процесс нагрева, как правило, автоматизирован, то процесс охлаждения в большей степени произволен. В данной статье описан способ автоматизации охлаждения. Таким образом решена важная задача комплексного управления процессами нагрева и охлаждения полуфабрикатов дисков ГТД.

В представленной статье описаны этапы разработки программного обеспечения системы управления температурой при термической обработке штамповки диска турбины ГТД по необходимому режиму изменяемого термопрофиля, разработаны алгоритмы управления нагрева муфельной печи и установкой охлаждения, предназначенной для термической обработки штамповок дисков турбины из жаропрочных никелевых сплавов.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБОРУДОВАНИЕ

Программно-технические комплексы (ПТК) представляют собой совокупность микропроцессорных средств автоматизации (микропроцессорных контроллеров, устройств связи объектом УСО), дисплейных пультов оператора и серверов различного назначения, промышленных сетей, которые позволяют связать перечисленные компоненты, программного обеспечения контроллеров и дисплейных пультов оператора. ПТК предназначены, в первую очередь, для создания распределенных систем управления технологическими процессами различной информационной мощности (от десятков входных/выходных сигналов до сотни тысяч) в самых разных отраслях промышленности.

Система верхнего иерархического уровня ПТК обеспечивает диспетчерский контроль и управление, а также сбор данных. Специальное программное обеспечение решает задачи ввода-вывода информации в системе управления, отслеживание аварийных и предаварийных ситуаций, обработки и представление оператору графической информации о процессе, поддержки отчетов о выполне-

нии технологического процесса. В мире существуют около десятка подобных систем. Имеются разработчики такого программного обеспечения и в России.

Датчик преобразует физические параметры технологического процесса в электрические сигналы, поступающие далее на контроллер.

Исполнительный механизм преобразует электрические сигналы в физические воздействия, осуществляющие управление параметрами технологического процесса в автоматическом или ручном режиме.

Контроллер предназначен для получения информации с датчиков, преобразования ее и обмена с другими компонентами системы автоматизации (компьютер оператора, монитор, база данных и т.д.) и управления исполнительными механизмами в реальном времени. Ранее в России широко применяли контроллеры производства таких западных компаний, как Siemens, SchneiderElectric, Allen-Bradly, PepModularComputers и др. В последнее время благодаря импортозамещению появляется все больше отечественных производителей конкурентоспособных устройств, на которых мы остановили свой выбор.

Автоматизированное рабочее место оператора (АРМ) – специально оборудованное место для персонала обслуживающего данный технологический процесс, куда поступает вся информация. В ряде случаев оператор может вмешаться в ход технологического процесса и перевести его на ручное управление.

Производство штамповок дисков турбины ГТД производится с применением автоматизированного управления. На последнем этапе изготовления штамповок проводится термическая обработка с последующим охлаждением по заранее подобранному режиму.

При проведении термической обработки используют следующее оборудование, контролируемое системой управления:

- пирометр ТЕРА-50;
- муфельная электропечь с двумя термодатчиками типа ТПП(S) для регулировки и контроля температуры;
- вентилятор охлаждения;
- частотный преобразователь Веспер Е2-8300.

Также установка охлаждения включает оборудование, которое не контролируется системой управления:

- электродвигатель с редуктором 12 В.
- Напряжение питания:
- электроприводов вентилятора охлаждения ~380 В, 50 Гц;
 - фехралевые нагреватели муфельной печи ~380 В, 50 Гц;

- средств КИП и А ~380 В, 50 Гц;
- АРМ ~220 В, 50 Гц;
- питание контролера 24 В.

Электропитание АРМ осуществляется через блок бесперебойного питания (ИБП).

Электрооборудование выполняет следующие функции:

- распределение и передача электроэнергии к электроприемникам;
- защита электроприемников и электрических сетей от перегрузок и токов короткого замыкания.

Нижний уровень включает в себя две ЛСУ, а именно:

- ЛСУ муфельной печи через термопару ТПП(S);
- ЛСУ установкой охлаждения через пирометр Тера-50.

Контроллер (центральный процессор), выполняют функции сбора, преобразования в цифровую форму сигналов от датчиков, преобразователей, сигналов состояния электрооборудования, отклонения технологических параметров от заданных значений, электрооборудования (преобразователей частоты, регуляторов напряжения).

АРМ верхнего уровня служат для отображения информации о ходе технологических процессов, состоянии исправности средств программно-технического комплекса (ПТК).

ХОД ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

В реальных физических процессах теплопроводность материалов сильно зависит от температуры, поэтому описать их линейными уравнениями математической физики не представляется возможным. Для описания таких процессов используются квазилинейные уравнения теплопроводности:

$$c(\mathbf{x}, t, u) \frac{\partial u(\mathbf{x}, t)}{\partial t} = \operatorname{div}(k(\mathbf{x}, t, u) \nabla u(\mathbf{x}, t)) + f(\mathbf{x}, t, u), \quad t > t_0, \quad \mathbf{x} \in \Omega,$$

где $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ – координаты точки в пространстве \mathbb{R}^n , $\Omega \subset \mathbb{R}^n$, $u(\mathbf{x}, t)$ – температура в точке \mathbf{x} в момент времени t ; t_0 – начальный момент времени; $c(\mathbf{x}, t, u)$ – объемная теплоемкость; $k(\mathbf{x}, t, u)$ – коэффициент внутренней теплопроводности; $f(\mathbf{x}, t, u)$ – плотность тепловых источников (количество поглощаемого или выделяемого тепла в единицу времени в единице объема тела).

Квазилинейными эти уравнения называются потому, что коэффициенты уравнения зависят от температуры и/или ее производных. Как известно из курса уравнений математической физики, решение линейных уравнений может иметь раз-

рывы только в том случае, когда они содержатся в начальных или граничных условиях. В квазилинейном уравнении даже при непрерывных и достаточно гладких начальных и граничных данных могут возникать разрывы решения. Получается, что при численном решении квазилинейного уравнения теплопроводности существуют решения $u(\mathbf{x}, t)$, производные которых в отдельных точках обращаются в бесконечность, такие решения близки к разрывным и при их расчете по немоноотонным, хотя и устойчивым схемам, возможна “разболтка” – зависимость результатов вычислений становится нерегулярно зависящей от величины шага [5].

Поскольку штамповка диска турбины имеет форму тела вращения, дальнейшие вычисления удобно проводить в цилиндрической системе координат. Отсутствует зависимость от полярного угла φ , нет внешних источников тепла, поэтому задачу можно записать в виде:

$$\begin{aligned} c(u) \frac{\partial u}{\partial t} &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r q(u) \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(q(u) \frac{\partial u}{\partial z} \right), \\ \frac{\partial u(r, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=\pm l_2} &= 0, \quad \frac{\partial u(r, z, t)}{\partial r} \Big|_{r=R_1, l_1 \leq |z| \leq l_2} = 0, \\ u(r, z, t) \Big|_{r=R_2, 0 \leq |z| \leq l_1} &= Q, \quad u(r, z, t) \Big|_{|z|=l_1, R_1 \leq r \leq R_2} = Q, \\ u(r, z, 0) &= u_0. \end{aligned}$$

Так как в уравнении присутствуют члены $q(u) \frac{\partial u}{\partial r}$ и $q(u) \frac{\partial u}{\partial z}$, то с помощью замены $G(u) = \int_0^u q(\xi) d\xi$ уравнение сведется к

$$\frac{\partial G}{\partial t} = a^2(u) \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 G}{\partial z^2} \right),$$

где $a(u) = \sqrt{\frac{q(u)}{c(u)}}$ – коэффициент температуропроводности. Заметим, что функция $G(u)$ строго монотонна по времени, так как производная $\frac{\partial G}{\partial t}$ сохраняет свой знак, поэтому существует обратная функция $G^{-1}(u)$.

Для составления разностного уравнения ведем регулярную сетку $\omega_{\Delta r, \Delta z, \tau} = \omega_{\Delta r} \times \omega_{\Delta z} \times \omega_{\tau}$,

$$\omega_{\Delta r} = \left\{ r_i = \left(i - \frac{1}{2} \right) \Delta r, \quad i = 1, 2, \dots, N \right\},$$

$$\omega_{\Delta z} = \left\{ z_k = \left(k - \frac{1}{2} \right) \Delta z, \quad k = 1, 2, \dots, M \right\},$$

$$\omega_{\tau} = \{ t_n = n\tau, \quad n = 0, 1, \dots \},$$

где $\Delta r = \frac{R}{N}$ – шаг по времени, $\Delta z = \frac{H}{M}$ – шаг по переменной z , τ – шаг по времени t .

Пусть $G_{ik} = G_{ik}(t)$ – значение функции G , а $u_{ik} = u_{ik}(t)$ – значение функции u в точке (t, r_i, z_k) приводит к уравнению в частных производных первого порядка

$$\frac{\partial G_{ik}}{\partial t} + \mu_{ik} G_{ik} = g_{ik},$$

где

$$\mu_{ik} = 2a^2(u_{ik}) \left(\frac{1}{\Delta r^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right),$$

$$g_{ik} = a^2(u_{ik}) \left(\left(\frac{1}{\Delta r^2} + \frac{1}{2r_i \Delta r} \right) G_{(i+1)k} + \left(\frac{1}{\Delta r^2} + \frac{1}{2r_i \Delta r} \right) G_{(i-1)k} + \frac{1}{\Delta z^2} (G_{i(k+1)} + G_{i(k-1)}) \right).$$

На текущем временном слое рассматривается уравнение

$$\frac{\partial \bar{G}_{ik}}{\partial t} + \mu_{ik} \bar{G}_{ik} = g_{ik},$$

с начальным условием

$$\bar{G}_{ik}(t)|_{t=0} = G_{ik}.$$

Коэффициент μ_{ik} в левой части считается замороженным (значения u_{ik} берутся с текущего временного слоя в момент $t = 0$). Уравнение решается на каждом слое по времени на отрезке $t \in [0, \tau]$. Его точным решением является функция

$$\bar{G}_{ik} = \frac{g_{ik}}{\mu_{ik}} + C \cdot e^{-\mu_{ik} t}.$$

Получим следующие расчетные формулы:

$$\bar{G}_{ik}^{n+1} = \frac{g_{ik}^n}{\mu_{ik}^n} + \left(\bar{G}_{ik}^n - \frac{g_{ik}^n}{\mu_{ik}^n} \right) \cdot e^{-\mu_{ik}^n \tau}.$$

На начальном временном слое

$$\bar{G}_{ik}^0 = \frac{g_{ik}}{\mu_{ik}} + C \cdot e^{-\mu_{ik} t},$$

где $\mu_k = a^2(u_{0k}) \left(\frac{4}{\Delta r^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right),$

$$g_k = a^2(u_{0k}) \left(\frac{4}{\Delta r^2} G_{1k} + \frac{G_{0(k+1)} + G_{0(k-1)}}{2\Delta z^2} \right).$$

Из решения уравнения получаем расчетные формулы для узлов сетки на оси цилиндра:

$$G_{0k}^{n+1} = G^{-1}(G_{0k}^{n+1}), \quad k = \overline{1, M}.$$

Коррелируем полученные расчетные значения с режимом термообработки.

Известно, что практически для всех сплавов, в том числе жаропрочных никелевых, существует зависимость физико-механических свойств от размера зерна, которая описывается уравнением Петча–Холла:

$$\sigma = \sigma_i + K_y d^{-1/2},$$

где σ – напряжение, σ_i и K_y – константы материала, d – размер зерна.

С увеличением протяженности границ (измельчением зерна) прочностные характеристики кратковременной прочности возрастают, а характеристики длительной прочности снижаются. Поэтому температуру закалки выбирают таким образом, чтобы обеспечить оптимальное сочетание свойств сплава за счет формирования в процессе закалки требуемого размера зерен сплава [6].

При проведении термической обработки полупроизводителей очень важна точность поддержания температуры. В силу того, что современные дисковые сплавы имеют сложный химический состав, значит, и фазовый состав, малейшее отклонение от необходимого значения температуры термической обработки может привести к тому, что не будет достигнута структура, обладающая высокими характеристиками. Так погрешность по температуре не должна превышать $\pm 2^\circ\text{C}$. Для решения этой задачи используется муфельная высокотемпературная печь с фехралевыми нагревателями.

На основе полученной математической модели проведения процесса термической обработки штамповки диска турбины и рассчитанной разностной схемы составлен алгоритм работы системы, представленный в виде блок-схемы на рис. 1.

Алгоритм работы системы был реализован на базе КТС МикКОН и ПО MWBridge (ядро реального времени для ОС Windows) с помощью встраиваемого алгоритмического языка [7–12].

Установка состоит из:

- муфельной электропечи с двумя термopарами типа ТПП(S) для регулировки и контроля температуры с фехралевыми нагревателями;
- пирометра Тера-50;
- вентилятора охлаждения;
- частотного преобразователя Веспер E2-8300.

Для реализации алгоритма управления использовался моноблок MB100, подсоединенный к ПК через интерфейс RS-485 при помощи преобразователя USB/RS-485 (передача данных осуществляется по протоколу Modbus). Данный моноблок реализует типовые законы регулирования с выходом как на пропорциональный исполнительный механизм, так и на интегрирующий с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). В данном модуле центрального процессора функционирует

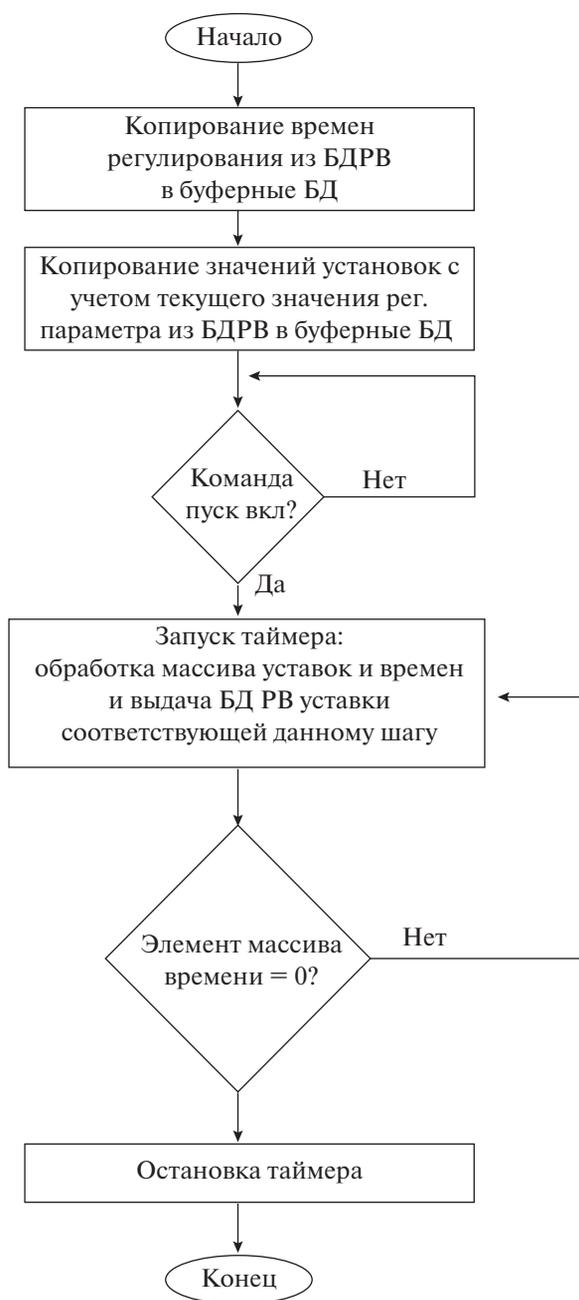


Рис. 1. Алгоритм работы системы.

база данных реального времени — программа MWBridge.

Структурная схема системы управления представлена на рис. 2.

Реализация разработанного алгоритма управления затруднена тем, что в конструкции установки охлаждения установлен редуктор, соединенный с электродвигателем, который дает вращательное движение штамповки диска для равномерного охлаждения. Один оборот диск совершает за 1.5 с, так как пирометр установлен ста-

ционарно, а штамповка вращается, пирометр будет принимать значения температуры из разных мест диска. Обод остывает быстрее, чем массивная ступица, в следствие чего температура на поверхности штамповки на ободу и ступице будет различная. Чтобы избавиться от скачков в показаниях и, следовательно, в регулирующем сигнале, в расчет берут среднюю температуру диска за один оборот. Для этого используют фильтр, вычисляющий среднее показание из всех показаний, полученных за период 1.5 с. Вышеуказанный

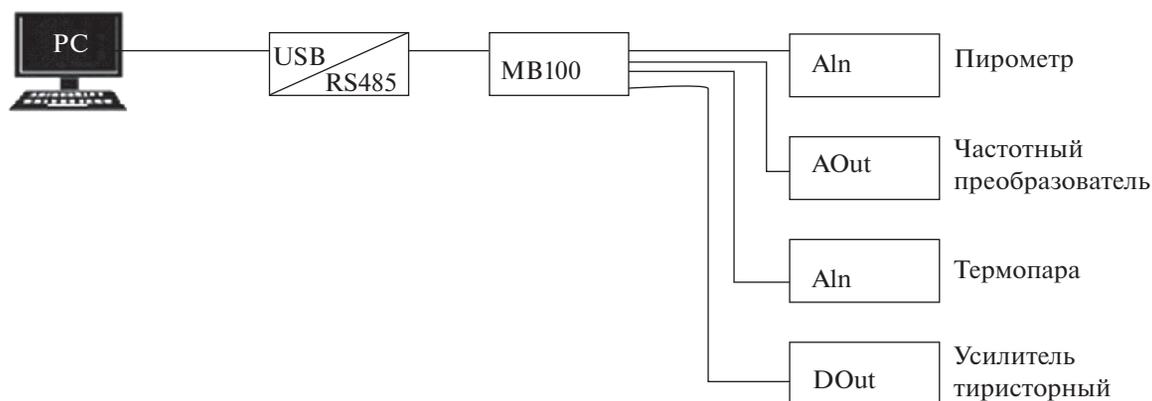


Рис. 2. Структурная схема системы управления.

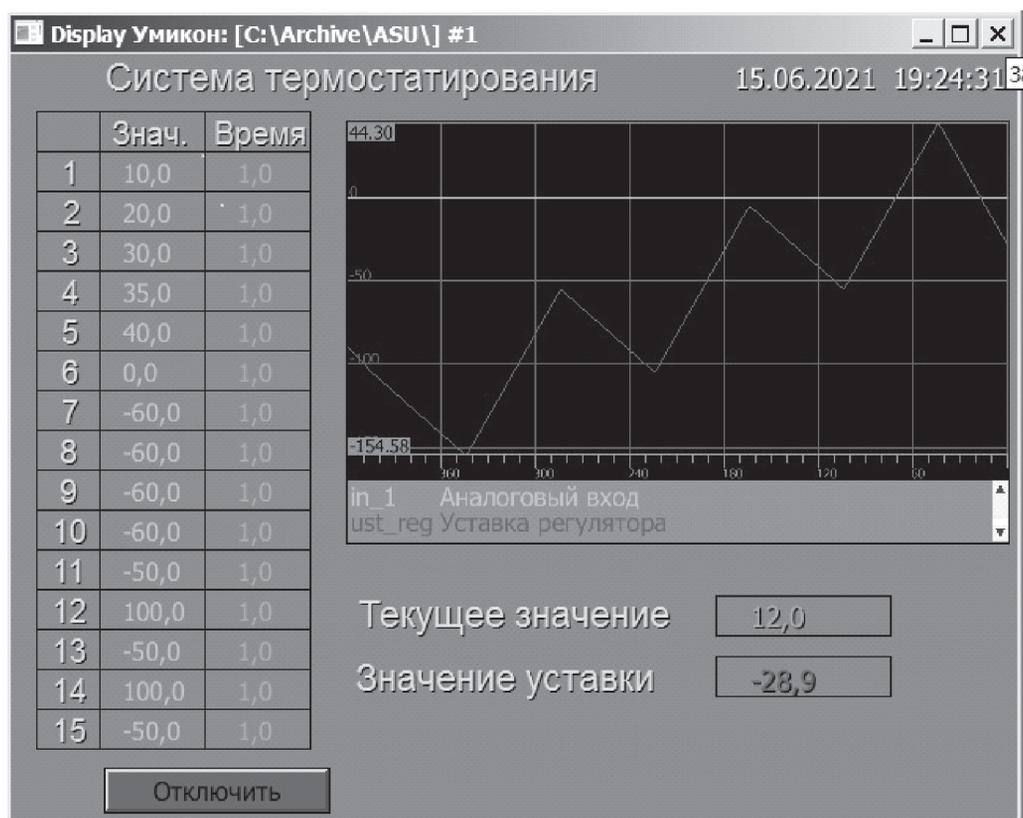


Рис. 3. Мнемосхема управления системой.

алгоритм реализован на основе алгоритма фильтра, скользящего среднего.

Для непосредственного взаимодействия оператора с системой при помощи ПО Display, входящего в ПТК УМИКОН, была разработана мнемосхема, представленная на рис. 3.

На экране мнемосхемы изображены массивы уставок для термостатирования и соответствующие

им времена выдержки, полученные при помощи разностной схемы, указанной выше. В нижнем левом углу находится кнопка включения и отключения алгоритма термостатирования, связанная на одну переменную с командой включения/выключения ПИД-регулятора. В верхнем правом углу находится календарь и часы с секундами, секунды служат для обеспечения индикации работоспособности системы отображения.

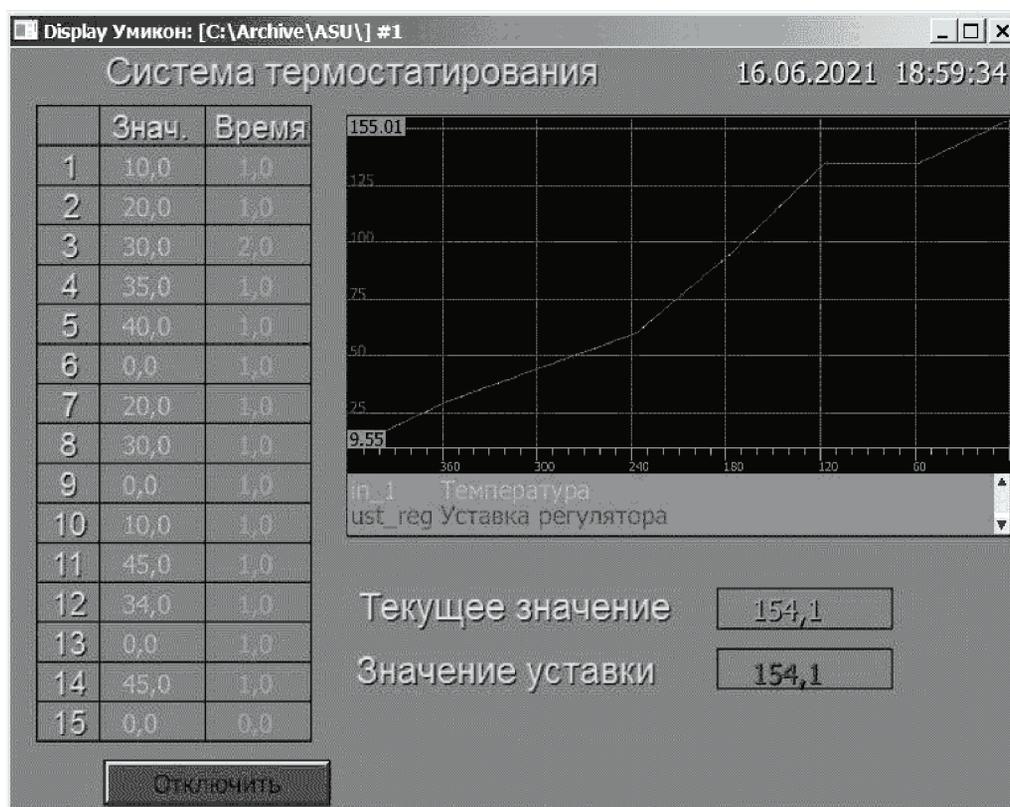


Рис. 4. Отладка работы регулятора по уставке.

Через ПИД-регулятор контролера МВ 100 на практике была проведена отладка и работа программы через мнемосхему. На рис. 4 показан процесс отладки работы регулятора по уставке.

Также был проведен процесс термической обработки штамповок в двух разных печах по двум вариантам управления муфельной печью. В первом варианте использовался дискретный выход управляющего сигнала, при помощи ШИМ через оптронную гальваническую развязку на тиристорный силовой блок. Во втором варианте был задействован аналоговый выход – на аналоговый вход тиристорного усилителя, подавался управляющий сигнал 4–20 мА. При помощи созданной программы был задан необходимый режим термической обработки: загрузка в горячую печь при T_1 , подъем со скоростью V_1 до T_2 , выдержка t_1 , далее подъем со скоростью V_2 до T_3 , выдержка t_2 и выгрузка на воздух. Охлаждение контролировали регулятором МВ 100 при помощи пирометра Тера 50 через частотный преобразователь оборотами вентилятора охлаждения. Далее был проведен процесс закалки шлифов, вырезанных с кольца технологического припуска штамповки диска, в двух разных печах. Архивные

диаграммы работы программ представлены на рис. 5 и 6.

По графикам видно, что процессы идентичны. Это подтверждается и микроструктурой шлифов, отрезанных от кольца технологического припуска штамповки, прошедших термическую обработку по одному режиму по двум вариантам управления печью. На рис. 7 и 8 показаны микроструктуры этих шлифов. Видно, что обе штамповки имеют структуру с размером зерна в диапазоне 100–150 мкм.

Таким образом, данную программу можно успешно использовать как с аналоговым, так и с дискретным выходами управляющих сигналов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы получены следующие результаты:

- рассмотрены наиболее известные средства разработки систем управления; описаны технические требования к системе; сформулирована цель работы;

- в соответствии техническими требованиями и количеством сигналов была разработана структурная схема системы управления;

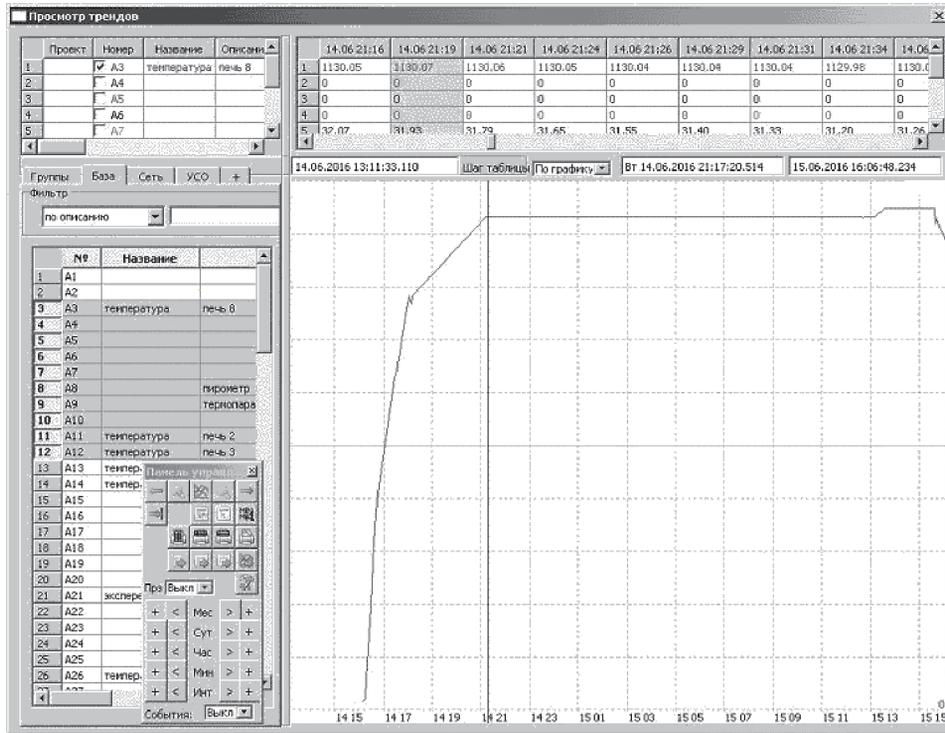


Рис. 5. График процесса термообработки на электропечи с аналоговым выходом управляющего сигнала.

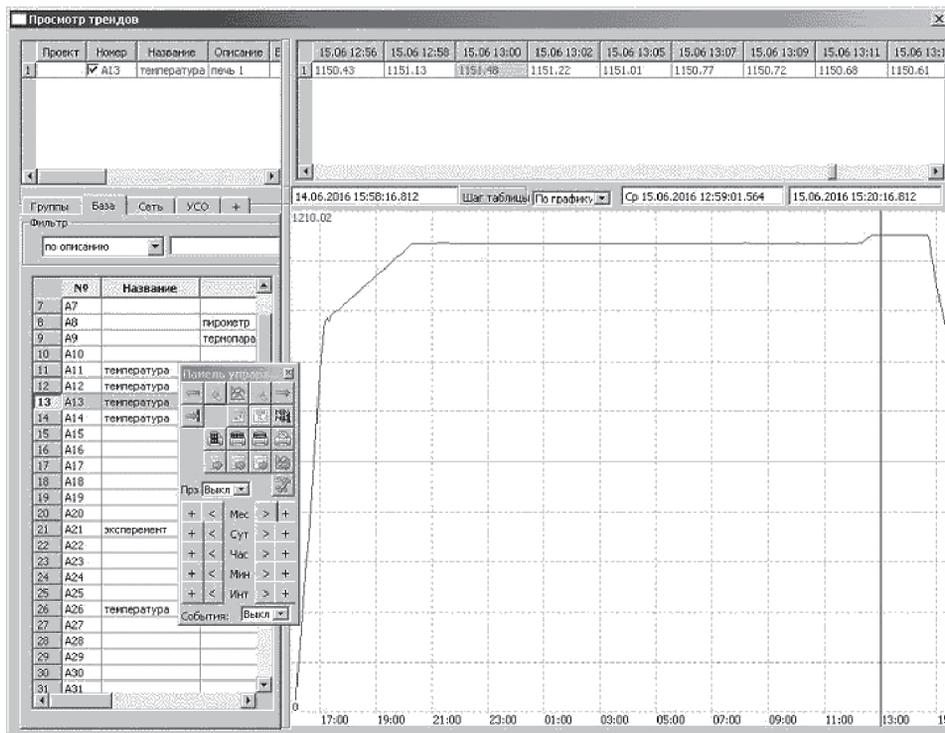


Рис. 6. График процесса термообработки на электропечи с дискретным управляющим ШИМ сигналом.

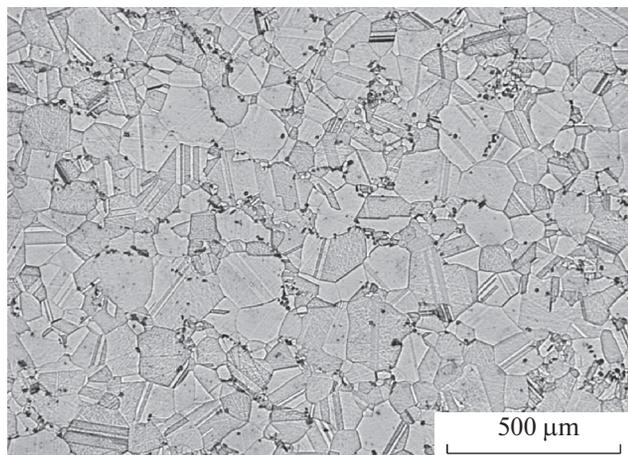


Рис. 7. Микроструктура шлифа, обработанного в электропечи с аналоговым выходом управляющего сигнала.

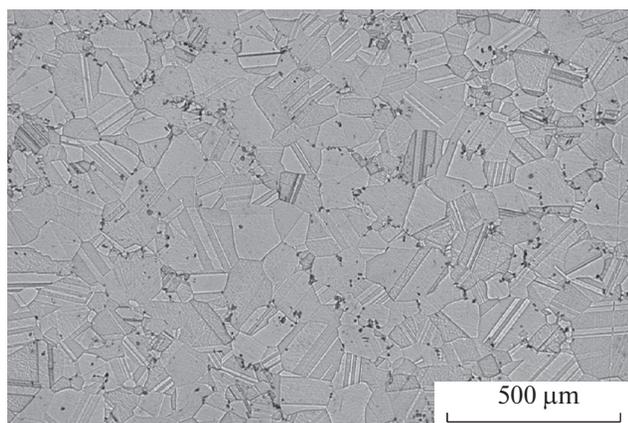


Рис. 8. Микроструктура шлифа, обработанного в электропечи с дискретным выходом управляющего сигнала.

— с помощью системы технологического программирования разработан и реализован алгоритм управления оборудованием;

— разработано в целом программное обеспечение системы управления муфельной печью и установкой охлаждения. В программном обеспечении реализовано аналоговое логическое управление процессом нагрева/охлаждения и поддержания температуры по заданной программе;

— создана мнемосхема управления термическим процессом (термостатированием), посредством которой производится управление термическим процессом.

Разработанные ПО системы управления прошли успешные испытания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Каблов Е.Н.* Инновационные разработки ФГУП “ВИАМ” ГНЦ РФ по реализации “Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года” // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1. С. 3–33.
2. *Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С.* Стратегические направления развития конструкционных материалов и технологий их переработки для авиационных двигателей настоящего и будущего // *Автоматическая сварка*. 2013. № 10. С. 23–32.
3. *Каблов Е.Н.* Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 7–17.
4. *Чабина Е.Б., Ломберг Б.С., Филонова Е.В., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М.* Изменение структурно-фазового состояния жаропрочного деформируемого никелевого сплава при легировании танталом и рением // *Труды ВИАМ*. 2015. № 9. ст. 03 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 26.12.2021 г.)
5. *Галактионов В.А., Дородницын В.А., Еленин Г.Г.* Квазилинейное уравнение теплопроводности с источником: обострение, локализация, симметрия, точные решения, асимптотики, структуры // *Итоги науки и техники. Серия Современные проблемы математики. Новые достижения*. 1986. № 28. С. 95–205.
6. *Беляев М.С., Терентьев В.Ф., Горбовец М.А., Бакрадзе М.М., Гольдберг М.А.* Малоцикловая усталость при заданной деформации и параметры упругопластического деформирования жаропрочного сплава ВЖ175 // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. № 54. С. 87–92.
7. *Лебедев В.О.* Руководство пользователя MWBridge MLB. 2020.
8. *Лебедев В.О.* Об оптимальной структуре комплекса технических средств АСУТП // *Автоматизация в промышленности*, 2013 г. № 7. С. 64–67.
9. *Колодников И.А., Лебедев В.О.* К вопросу об архитектуре современных АСУТП // *Автоматизация в промышленности*. 2018. № 8. С. 9–12.
10. *Balakin B.V., Delov M.I., Kutsenko K.V., Lavrukhin A.A., Laouar S., Litvintsova Y.E., Marchenko A.S., Maslov Y.A.* Analyzing temperature fluctuations to predict boiling regime // *Thermal Science and Engineering Progress*. 2017. V. 4. P. 219–222.
11. *Patel A.R., Ramaiya K.K., Bhatia C.V., Shah H.N., Bhavsar S.N.* Artificial Intelligence: Prospect in Mechanical Engineering Field – A Review. // *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, 2021. V. 52. P. 267–282.
12. *Volodin V.S., Tolokonsky A.O.* Implementation of the diversity principle of software and hardware complexes of process control systems for nuclear facilities in educational process // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy, Yadernaya Energetika*, 2018. V. 2018. № 1. Q4 P. 154–164.

Development of an Automatic Heating and Cooling System for the Heat Treatment of Gas Turbine Engine Disks

P. B. Rimsha^{a,#} and A. O. Tolokonskiy^{a,##}

^a National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

[#] e-mail: paulickche@gmail.com

^{##} e-mail: toloconne@yandex.ru

Received December 29, 2021; revised December 30, 2021; accepted December 30, 2021

Abstract—Gas turbine engines are complex devices that convert air and fuel into a gas–air mixture, which is used to create jet thrust. Gas turbine engine parts undergo increased loads, in particular, temperature loads. High-strength materials are used to manufacture these parts, and a class of heat-resistant nickel-based alloys are used for parts operating at high temperatures. Turbine discs for gas turbine engines with operating temperatures up to 800°C are one of the most heavily loaded parts. High demands are placed on disk heat-resistant alloys and their manufacturing process, including heat treatment. It is necessary to strictly control the technological parameters of the heat treatment mode, including the heat treatment temperature and the cooling rate of semi-finished products. The software for a control system for a given mode of a variable thermal profile is developed in this work. The structure of the system, its organization, and development and debugging stages are described. Algorithms have been developed to control heating of a muffle furnace and a cooling unit. The developed program allows the heat treatment of the stamping of the disk of a gas turbine engine according to a preselected mode. This makes it possible to obtain the required structure of a nickel-based deformable superalloy, which in turn significantly increases the operation characteristics.

Keywords: temperature control system, technological process, heat treatment, quasi-linear equations

DOI: 10.1134/S2304487X21050084

REFERENCES

1. Kablov E.N., Innovacionnye razrabotki FGUP "VIAM" GNC RF po realizacii "Strategicheskikh napravlenij razvitiya materialov i tekhnologij ih pererabotki na period do 2030 goda" [Innovative developments of FSUE "VIAM" SSC RF for the implementation of "Strategic directions for the development of materials and technologies for their processing for the period up to 2030"], *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2015, no. 1, pp. 3–33 (in Russian).
2. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Lomberg B.S., *Strategicheskie napravleniya razvitiya konstrukcionnykh materialov i tekhnologij ih pererabotki dlya aviacionnykh dvigatelej nastoyashchego i budushchego* [Strategic directions for the development of structural materials and technologies for their processing for aircraft engines of the present and future], *Avtomaticheskaya svarka*, 2013, no. 10, pp. 23–32 (in Russian).
3. Kablov E.N., *Strategicheskie napravleniya razvitiya materialov i tekhnologij ih pererabotki na period do 2030 goda* [Strategic directions for the development of materials and technologies for their processing for the period up to 2030], *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2012, no. 5, pp. 7–17 (in Russian).
4. Chabina E.B., Lomberg B.S., Filonova E.V., Ovsepyan S.V., Bakradze M.M., *Izmenenie strukturno-fazovogo sostoyaniya zharoprochnogo deformiruемого никелевого сплава при легировании танталом и рением* [Changes in the structural-phase state of a heat-resistant wrought nickel alloy upon alloying with tantalum and rhenium], *Trudy VIAM*, 2015, no. 9, st. 03 URL: <http://www.viam-works.ru> (data obrashcheniya 26.12.2021 g.) (in Russian).
5. Galaktionov V.A., Dorodnicyn V.A., Elenin G.G., *Kvazilinejnoe uravnenie teploprovodnosti s istochnikom: obostrenie, lokalizaciya, simmetriya, tochnye resheniya, asimptotiki, struktury* [Quasilinear heat equation with a source: sharpening, localization, symmetry, exact solutions, asymptotics, structures], *Itogi nauki i tekhniki. Seriya Sovremennye problemy matematika. Novye dostizheniya*, 1986, no. 28, pp. 95–205 (in Russian).
6. Belyaev M.S., Terent'ev V.F., Gorbovec M.A., Bakradze M.M., Gol'dberg M.A., *Malociklovaya ustalost' pri zadannoj deformacii i parametry uprugoplasticheskogo deformirovaniya zharoprochnogo сплава VZh175* [Low-cycle fatigue at a given deformation and parameters of elastoplastic deformation of VZh175 heat-resistant alloy], *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2014, no. S4, pp. 87–92 (in Russian).
7. Lebedev V.O., *Rukovodstvo polzovatelya MWBridge MLB* [MWBridge MLB user guide], 2020, 246 p. (in Russian)

8. Lebedev V.O., Ob optimalnoy structure kompleksa tehnikeskikh sredstv ASUTP [The complex of technical means of the process control system's optimal structure], *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*, 2013, no. 7, pp. 64–67 (in Russian).
9. Kolodnikov I.A., Lebedev V.O., K voprosu ob arhitekture sovremennykh ASUTP [On the question of the modern process control systems architecture], *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*, 2018, no. 8, pp. 9–12 (in Russian).
10. Balakin B.V., Delov M.I., Kutsenko K.V., Lavrukhin A.A., Laouar S., Litvintsova Y.E., Marchenko A.S., Maslov Y.A., Analyzing temperature fluctuations to predict boiling regime, *Thermal Science and Engineering Progress*, 2017, vol. 4, pp. 219.
11. Patel A.R., Ramaiya K.K., Bhatia C.V., Shah H.N., Bhavsar S.N., Artificial Intelligence: Prospect in Mechanical Engineering Field – A Review. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, 2021, vol. 52, pp. 267–282.
12. Volodin V.S., Tolokonsky A.O., Implementation of the diversity principle of software and hardware complexes of process control systems for nuclear facilities in educational process, *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy, Yadernaya Energetika*, 2018, vol. 2018, no. 1, Q4 pp. 154–164.