

Теоретическое прогнозирование температурно-временного режима термоциклической обработки

Казачков О.В.,¹

Куколев М.И.

Петрозаводский государственный университет

Разработана программа расчета временных параметров термоциклической обработки заготовок деталей из сталей. Проведен физический эксперимент. Показана целесообразность применения программы при проведении термоциклической обработки. Сделан вывод о преимуществе термоциклической обработки по сравнению с объемной термообработкой.

Ключевые слова: термоциклическая обработка, температурно-временные режимы, механические свойства, микроструктура.

Одним из эффективных энергосберегающих методов упрочнения деталей является термоциклическая обработка (ТЦО) [1]. Технология ТЦО заключается в многократном ускоренном нагреве до температуры, превышающей A_{c1} на 30..50°C с последующим промежуточным охлаждением на воздухе до температуры на 50..80°C ниже температуры A_{r1} (A_{c1} и A_{r1} - температуры фазового превращения, рис.). Охлаждение после последнего нагрева проводится вначале на воздухе до окончания превращения γ в α -фазу. Далее возможно охлаждение в масле, воде или на воздухе.

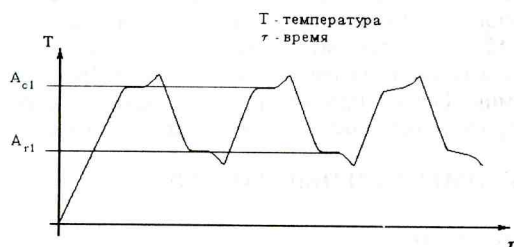


Рис. Кривая нагреваний и охладений при ТЦО

Принципиальное отличие данной технологии упрочнения от традиционной состоит в отсутствии выдержки при постоянной температуре.

При осуществлении ТЦО деталей необходимо прогнозировать длительность как всего процесса в целом, так и продолжительность каждого термоцикла в отдельности. Скорость нагрева до необходимых темпе-

ратур определяется температурой печи и массой термообрабатываемых изделий. Экспериментальный подбор температуры печи для обеспечения нужной скорости нагревания производится путем построения кривых нагревания конкретных изделий. Для этого один раз с помощью электронного потенциометра и зачеканенной в изделие термопары записываются кривые нагреваний и охладений. Такое измерение для каждой конкретной детали трудно осуществить в условиях промышленного производства, что сдерживает широкое применение ТЦО.

Учитывая трудоемкость процесса измерения, представляет интерес разработка теоретических моделей, позволяющих достаточно точно рассчитать температурно-временные параметры для проведения процесса ТЦО.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Основа методики, по которой строилась расчетная программа, изложена в [2]. Кратко остановимся на теоретических предпосылках.

Определение сопряженных температурных полей системы тел (изделие, печь, газовая среда) отличается большой сложностью. Обычно задачу решают по частям, отдельно определяя температурное поле термообрабатываемого изделия при произвольно задаваемых граничных условиях внешнего теплообмена (решение внутренней задачи теплообмена). В случае же задания условий на поверхности термообрабатываемого изделия решается задача внешнего теплообмена. Общее решение ищется итерационной стыковой внутренней и внешней задач.

Однако в ряде частных случаев можно ограничиться решением только внутренней или только внешней задачи. Если B_i (число Био), являющееся отношением внутреннего термического сопротивления нагреваемого (охлаждаемого) изделия к внешнему термическому сопротивлению среды, больше 10 (т.е. термическое сопротивление изделия на порядок больше термического сопротивления внешнего теплообмена), то время нагрева (охлаждения) лимитировано процессом переноса теплоты в материале изделия. В этом случае допустимо ограничиться решением только внутренней задачи.

Если изделие можно отнести к термически тонким телам (т.е. можно пренебречь перепадом температур при сохранении пределов допустимой погрешности инженерных расчетов), то для него справедливо условие $B_i < 0.1$. Тогда температурное поле такого изделия будет определяться практически только его средне-массовой температурой T_{cp} , причем можно принимать равными указанной температуре как температуру центра изделия, так и температуру нагреваемой (охлаждаемой) поверхности.

К термически тонким можно отнести и изделия больших размеров, если соблюдать условие $B_i < 0.1$. Следовательно, решение внутренней задачи также можно исключить.

¹ Авторы, соответственно, доцент и ведущий инженер кафедры технологии металлов и ремонта
© О.В.Казачков, М.И.Куколев, 1996

Если термически тонкое тело с постоянными коэффициентами и начальной температурой $T_{на}$ нагревалось (охлаждалось) конвекцией в среде $T_n = \text{const}$ при $\alpha = \text{const}$, то время нагрева определится по формуле:

$$\tau = \frac{c \cdot \rho \cdot R_v}{\alpha} \cdot \ln \left(\frac{T_n - T_{на}}{T_n - T_{ср}} \right),$$

где

τ - время нагрева (охлаждения);
 c - удельная теплоемкость материала;
 ρ - плотность материала;
 R_v - обобщенный размер тела:

$$R_v = \frac{R}{k}.$$

R - радиус цилиндра, шара или половина толщины пластины;
 k - коэффициент формы тела, равный:
 1 - для пластины, 2 - для цилиндра, 3 - для шара;
 α - коэффициент теплоотдачи;
 $T_{на}$ - начальная температура тела в процессе;
 $T_{ср}$ - среднemasсовая температура тела (конечная в процессе).

В случае $0.1 < B_i < 1.0$ уже нельзя пренебрегать разницей между температурой поверхности и среднemasсовой температурой. Однако и в этом случае можно в расчетах принять закон распределения температуры по сечению тела, описываемый уравнением квадратной параболы. Вводится коэффициент массивности тела M :

$$M = \frac{2 + k}{2 + k + B_i}.$$

В этом случае время будет определяться по формуле:

$$\tau = \frac{c \cdot \rho \cdot R_v}{\alpha \cdot M} \cdot \ln \left(\frac{T_n - T_{на}}{T_n - T_{ср}} \right).$$

Учитывая уровни температур процессов ТЦО сталей, необходимо отметить, что коэффициент теплоотдачи α является суммой коэффициентов теплоотдачи конвекцией и излучением:

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_{и}.$$

В общем случае оба процесса оказывают взаимное влияние друг на друга, но при расчете этого влияния возникают трудности. На практике принято производить расчет по методу эквивалентной теплоотдачи, когда лучистый тепловой поток заменяют эквивалентным конвективным с коэффициентом теплоотдачи $\alpha_{ки}$ [3]:

$$\alpha_{ки} = C_{п} \cdot \frac{\left(\frac{T_{п}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T}{100} \right)^4}{T_{п} - T},$$

где

$C_{п}$ - приведенный коэффициент взаимного излучения;
 $T_{п}$ - температура печи;
 T - температура нагреваемой поверхности.

ПАРАМЕТРЫ РАСЧЕТА

На основании изложенных теоретических предпосылок была разработана компьютерная программа для расчета температурно-временных режимов при ТЦО. В качестве примера был проведен такой расчет для стальной (Сталь 45) поковки: диаметр 50 мм, длина 70 мм.

На стадии нагрева задача формулировалась следующим образом. Задан ограниченный цилиндр диаметром D и длиной L . Производится его нагрев в печи с постоянной температурой $T_{п}$. Начальная температура T_1 , конечная - T_2 на первом термоцикле; T_p , T_2 - соответственно начальная и конечная температура на каждом последующем термоцикле. Требуется определить время нагрева на первом и каждом из последующих циклов.

На стадии охлаждения задача формулировалась так: Ограниченный цилиндр радиусом R и длиной L остывает на воздухе от температуры T_2 до температуры T_p . Требуется определить время охлаждения.

Проведенные расчеты показали, что для нагрева данной детали на первом термоцикле от 293 до 1073K потребуется 14 мин при температуре печи 1173K; на последующих термоциклах 5 мин для температур от 873 до 1073K. Время, затрачиваемое на промежуточное охлаждение от температуры 1073 до 873K составит 5 мин. Общее прогнозируемое технологическое время при четырех термоциклах составляет 49 мин.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

По результатам расчетов была проведена ТЦО. Исследуемая деталь подвергалась четырехкратному нагреву до $800 \pm 10^\circ\text{C}$ в печи, предварительно нагретой до 900°C ; промежуточному охлаждению до температуры $600 \pm 10^\circ\text{C}$, окончательное охлаждение - прерывистое: вначале на воздухе до температуры $600 \pm 10^\circ\text{C}$, а затем быстрое охлаждение в воде до комнатной температуры. Время нагрева и охлаждения контролировалось с помощью хромель-алюмелевой термопары, зачеканенной в боковую поверхность исследуемой детали.

В качестве термообработки (ТО) для данной группы деталей на заводе используется улучшение - закалка до $860 + 20^\circ\text{C}$ в масле и высокий отпуск до 550°C .

Было установлено, что данные расчетов хорошо согласуются с проведенным экспериментом.

АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛА ПОСЛЕ ТЦО

Металлографические исследования, проведенные после процесса ТЦО с предварительным расчетом температурно-временных параметров по разработанной программе, выявили в микроструктуре мелкозернистый перлит (балл зерна 9...10) с зернистой и пластинчатой формами цементита.

По результатам механических испытаний на разрыв и ударный изгиб образцов было установлено, что ТЦО по сравнению с улучшением существенно повышает пластичность и ударную вязкость (табл.).

Так, относительное остаточное удлинение увеличивается с 19% до 25%, пластичность с 52% до 62%, а ударная вязкость с 0.67МДж/м² до 1.21МДж/м², т.е. примерно в 2 раза. Уменьшение отношения $\sigma_{0.2}/\sigma_{в}$ с 0.9 до 0.63 в результате ТЦО также является положительным фактом с точки зрения повышения надежности материала.

Твердость стали при ТЦО снизилась с НВ 2410МПа до НВ 2070МПа (на 16%).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненной работы свидетельствуют о возможности разработки сравнительно простых методик расчета температурно-временных параметров ТЦО.

Структурно-чувствительные характеристики механических свойств (ударная вязкость, относительное остаточное удлинение и сужение) в процессе ТЦО увеличиваются, что указывает на повышение надежности материала по сравнению с этими же характеристиками после улучшения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федюкин В.К. Метод термоциклической обработки металлов. Л.: Изд-во ЛГУ, 1984. 192с.
2. Перелетов И.И., Бровкин Л.А., Розенгарт Ю.И. и др. Высокотемпературные теплотехнологические процессы и установки. М.: Энергоатомиздат, 1989. 336 с.
3. Симсон А.Э., Михайлов И.Д., Сахаревич В.Д., Перелет В.И. Транспортная теплотехника. М.: Транспорт, 1988. 319с.

Размер зерна и механические свойства стали 45 после ТЦО и улучшения (закалка с высоким отпуском)*

Таблица

№ п/п	Вид	Балльность	$\sigma_{в}$, МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ , %	ψ , %	КСУ, МДж/м ²	НВ, МПа
1	ТО							
1	ТЦО	9...10	730	470	25	62	1.21	2070
2	Улучшение	4...6	830	750	19	52	0.67	2410

* Исследования выполнены в ЦЗЛ АО"ОТЗ" Зерновой Г.И. и Ухановой Т.Г.