

УДК 621.793

КИНЕТИКА НАГРЕВА ПРИ МИКРОДУГОВОЙ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

© М. С. Степанов, Ю. М. Домбровский, Ю. А. Корнилов¹*Статья поступила 6 ноября 2014 г.*

Исследована температура процесса микродуговой химико-термической обработки, при которой обрабатываемое стальное изделие, погруженное в контейнер с порошком каменного угля, нагревают пропусканием электрического тока. Особенность процесса заключается в образовании в порошковой среде микродуговых разрядов, концентрирующихся в локальной зоне вокруг изделия. Рассчитана теоретическая температура горения каменного угля. Для измерений использовали платино-платинородиевую термопару. Контакты термопары подсоединяли к цифровому мультиметру, с которого измерительная информация передавалась на персональный компьютер. Получена экспериментальная зависимость температуры поверхности образца от времени, на которой выделены четыре участка, отличающиеся кинетикой нагрева изделия. Обнаружены снижение скорости нагрева образца в интервале 200 – 270 °С, обусловленное эндотермическими реакциями в каменном угле, и стабилизация температуры изделия на уровне 1250 °С, связанная с особенностями тепловыделения при горении угля в рабочей ячейке.

Ключевые слова: поверхностное упрочнение стальных изделий; химико-термическая обработка; микродуговой нагрев в порошковой среде каменного угля.

Один из перспективных технологических процессов поверхностного упрочнения стальных изделий — микродуговая химико-термическая обработка (МДХТО) [1, 2], при которой обрабатываемое изделие погружают в контейнер с порошком каменного угля и нагревают пропусканием электрического тока. При прохождении электрического тока через порошок в местах контакта частицы порошка нагреваются и выгорают, что приводит к замыканию и размыканию возникающих проводящих цепочек. В результате образуются микродуговые разряды, имеющие вид ярких искровых каналов. Это, в свою очередь, приводит к увеличению скорости формирования диффузионных слоев [1].

В работе [2] описано явление концентрации микродуг в локальной зоне вокруг обрабатываемого изделия, объясняемое увеличением плотности тока по сечению порошковой среды в направлении от контейнера к образцу. В результате при цементации стали 20 за 2 – 3 мин обработки наблюдали образование науглероженного слоя эвтектоидной концентрации глубиной до 0,3 мм. Для насыщения слоя другими (помимо углерода) элементами используют содержащую диффузانت электропроводную обмазку, которую предварительно наносят на поверхность изделия.

Важнейший параметр МДХТО — температура. Информация о ней позволяет анализировать основные процессы, протекающие при диффузионном насыщении: образование активных атомов диффузанта, их ад-

сорбция насыщаемой поверхностью, диффузия вглубь стального образца. Данные о температуре особенно важны в связи с кратковременностью процесса обработки, в то же время в литературе отсутствуют сведения об особенностях кинетики нагрева стального образца пропусканием электрического тока через угольный порошок.

Цель работы — изучение кинетики нагрева поверхности стальных образцов при МДХТО.

Температуру процесса МДХТО измеряли на экспериментальной установке (рис. 1). Спай термопары с диаметром провода 0,3 мм был зачеканен в поверхность цилиндрического образца из стали 20 диаметром 12 и длиной 35 мм, погруженного на 15 мм в рабочую ячейку с порошком каменного угля (размер частиц 0,4 – 0,6 мм). Ячейка располагалась в контейнере, также заполненном угольным порошком. Свободные концы термопары подсоединяли к цифровому мультиметру APPA-305, с которого измерительная информация передавалась на персональный компьютер через интерфейс RS-232 (рис. 2). Для обработки результатов использовали программное обеспечение WinDMM 300. МДХТО проводили на постоянном питающем напряжении 250 В при силе тока в цепи 3 А.

Экспериментальная зависимость температуры поверхности образца от времени представлена на рис. 3. На графике можно выделить четыре участка, отличающиеся скоростью нагрева образца. На 1-м (до 200 °С) средняя скорость нагрева составляет 16 °С/с, на 2-м (200 – 270 °С) она резко снижается (до

¹ Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия; e-mail: stepanovms@yandex.ru

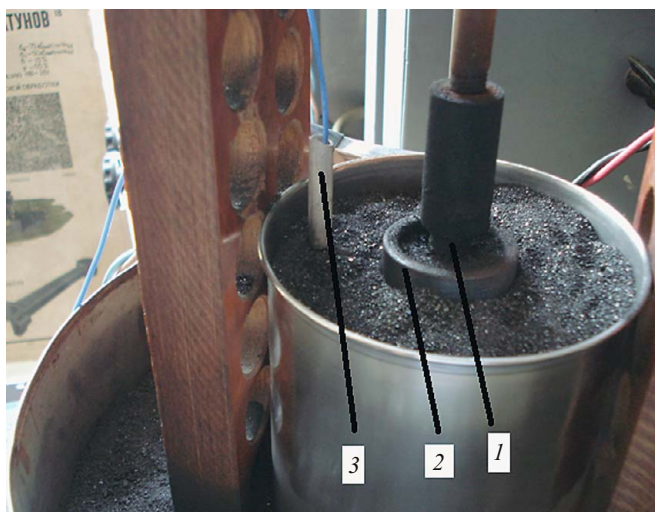


Рис. 1. Экспериментальная установка для проведения МДХТО: 1 — образец; 2 — рабочая ячейка с порошком каменного угля; 3 — выводы термопары

3,5 °C/с), на 3-м (270 – 1250 °C) в начале наблюдается почти равномерный нагрев со скоростью 9 °C/с, которая затем снижается до нулевого значения. В результате этого на 4-м участке температура стабилизируется на уровне 1250 °C.

Известно [3 – 5], что структура каменного угля состоит из макромолекул нерегулярного строения. При их нагревании происходит распад органического вещества с образованием твердых, жидких и газообразных продуктов. В интервале температур 200 – 270 °C протекают эндотермические процессы, сопровождающиеся активацией макромолекул и термическим разрывом наименее прочных связей. При этом тепло расходуется на испарение воды, выделение оксида и диоксида углерода. В результате и наблюдали существенное снижение скорости нагрева на 2-м участке.

Для выявления причин стабилизации температуры образца на 4-м участке и оценки влияния тепла, выделяющегося при горении угля, на температуру МДХТО оценивали теоретическую температуру горения каменного угля. Рассматривали уголь, имеющий следующий состав основных элементов, % масс.: 79 — C; 4,5 — H; 4 — S; 3 — O; 1,5 — N; 3 — вода. Объем продуктов сгорания угля определяли по методике и справочным данным [6], значение теплоты сгорания — по формуле Менделеева [7].

Для расчета температуры горения использовали средние значения теплоемкости [6, 7]:

$$T = T_0 + \frac{Q}{\sum V_i C_i},$$

где T — теоретическая температура горения, °C; T_0 — начальная температура, °C; Q — удельная теплота сгорания, Дж/кг; V_i — удельный объем i -го компонента продуктов горения, м³/кг; C_i — удельная теп-

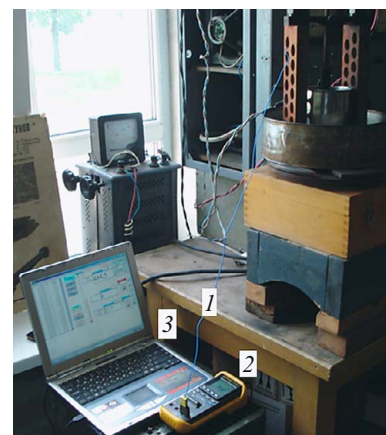


Рис. 2. Измерительная установка для определения температуры процесса МДХТО: 1 — вывод термопары; 2 — цифровой мультиметр; 3 — персональный компьютер

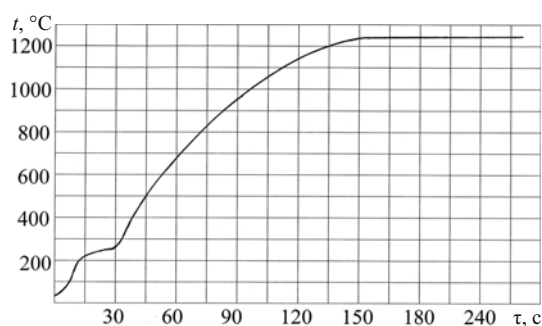


Рис. 3. Зависимость температуры поверхности образца от времени

лоемкость i -го компонента продуктов горения, Дж/(м³ · град).

Теоретическая температура горения T составила 1750 °C. Этот результат согласуется с данными, полученными при экспериментальном исследовании температуры горящих угольных частиц размером 0,5 мм. Как было показано, после воспламенения происходит быстрый нагрев частицы с дальнейшей стабилизацией температуры на уровне, зависящем от содержания кислорода в реакционном пространстве; в открытой атмосфере он составил около 1630 °C [8].

При МДХТО пиролиз угольного порошка сопровождается выделением оксида и диоксида углерода, что приводит к существенному уменьшению содержания кислорода в объеме рабочей ячейки и снижению температуры горения угольных частиц, в результате чего температура поверхности образца имеет более низкое значение по сравнению с расчетным.

Таким образом, в работе изучена кинетика нагрева поверхности металлического образца в порошке каменного угля за счет пропускания электрического тока, обнаружена аномалия на кривой нагрева, проявляющаяся в снижении скорости нагрева изделия в интервале 200 – 270 °C, которое объясняется эндотермическими реакциями в угольном порошке при этой температуре. Показано, что температура МДХТО стабилизируется на уровне 1250 °C, что примерно на 500 °C ниже расчетного и экспериментального [8] зна-

чений. Это обусловлено снижением температуры горения угольных частиц из-за пониженного содержания кислорода в рабочей ячейке (по сравнению с атмосферным) в результате газовой выделения при пиролизе угольного порошка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ворошнин Л. Г., Менделеева О. Л., Сметкин В. А. Теория и технология химико-термической обработки. — М.: Новое знание, 2010. — 304 с.
2. Домбровский Ю. М., Степанов М. С. Микродуговая цементация стальных изделий в порошковых средах / Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 12. С. 25 – 29.
3. Химия и переработка угля / В. Г. Липович, Г. А. Калабин, И. В. Калечиц и др. Под общ. ред. В. Г. Липовича. — М.: Химия, 1988. — 336 с.
4. Глушенко И. М. Теоретические основы технологии горючих ископаемых. — М.: Металлургия, 1990. — 296 с.
5. Химическая технология твердых горючих ископаемых / Под ред. Г. Н. Макарова, Г. Д. Харламповича. — М.: Химия, 1986. — 496 с.
6. Девисилов В. А., Дроздова Т. И., Тимофеева С. С. Теория горения и взрыва: практикум: учебное пособие / Под общ. ред. В. А. Девисилова. — М.: ФОРУМ, 2012. — 352 с.
7. Основы практической теории горения: учебное пособие для вузов / В. В. Померанцев, К. М. Арефьев, Д. Б. Ахмедов и др. — Л.: Энергоатомиздат, 1986. — 312 с.
8. Бабий В. И., Куваев Ю. Ф. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 208 с.

REFERENCES

1. Voroshnin L. G., Mendeleeva O. L., Smetkin V. A. Teoriya i tekhnologiya khimiko-termicheskoi obrabotki [Theory and technology of chemical heat treatment]. — Moscow: Novoe znanie, 2010. — 304 p. [in Russian].
2. Dombrovskiy Yu. M., Stepanov M. S. Mikrodrugovaya tsementatsiya stal'nykh izdelii v poroshkovykh sredakh [Microarc carburizing of steel products in powder environments] / Uprochn. Tekhnol. Pokryt. 2013. N 12. P. 25 – 29 [in Russian].
3. Lipovich V. G., Kalabin G. A., Kalechic I. V., et al. Khimiya i pererabotka uglya [Chemistry and processing of coal]. — Moscow: Khimiya, 1988. — 336 p. [in Russian].
4. Glushchenko I. M. Teoreticheskie osnovy tekhnologii goryuchikh isko-paemykh [Theoretical bases of technology of combustible minerals]. — Moscow: Metallurgiya, 1990. — 296 p. [in Russian].
5. Makarov G. N., Kharlampovich G. D. (eds.). Khimicheskaya tekhnologiya tverdykh goryuchikh isko-paemykh [Chemical technology of solid fuels]. — Moscow: Khimiya, 1986 — 496 p. [in Russian].
6. Devisilov V. A., Drozdova T. I., Timofeeva S. S. Teoriya goreniya i vzryva: praktikum: uchebnoe posobie [Theory of combustion and explosion: workshop: tutorial]. — Moscow: FORUM, 2012. — 352 p. [in Russian].
7. Pomerantsev V. V., Aref'ev K. M., Akhmedov D. B., et al. Osnovy prakticheskoi teorii goreniya: uchebnoe posobie dlya vuzov [Fundamentals of practical combustion theory]. — Leningrad: Énergoatomizdat, 1986. — 312 p. [in Russian].
8. Babii V. I., Kuvaev Yu. F. Gorenienie ugol'noi pyli i raschet pyleugol'nogo fakela [Combustion of coal dust and calculation of coal-fired torch]. — Moscow: Énergoatomizdat, 1986. — 208 p. [in Russian].

УДК 54.03

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СТЕКЛОВАНИЯ ВЛАЖНЫХ ОБРАЗЦОВ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО МЕХАНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

© А. А. Шимкин, М. А. Хасков¹

Статья поступила 19 декабря 2014 г.

Определение температуры стеклования влажных образцов осложнено десорбцией влаги в процессе измерения, что приводит к завышенным результатам, особенно при низких скоростях нагревания. Исследование возможности устранения этой проблемы при использовании методики экстраполяции, описанной в ISO 6721–11, показало ограниченную применимость метода, поскольку при определенных степенях влагонасыщения линейная зависимость температуры стеклования от скорости нагревания нарушается. Отмечено, что в качестве характеристической температуры стеклования вместо точки перегиба на кривой динамического модуля упругости может использоваться максимум модуля механических потерь, при этом наблюдается линейная зависимость экстраполированной температуры стеклования от времени кипячения образцов.

Ключевые слова: влагонасыщение; динамический механический анализ; композиционные материалы; модуль потерь; температура стеклования.

В последние годы в элементах конструкций металлические сплавы все чаще заменяют на полимерные композиционные материалы (ПКМ), что позволяет уменьшить массу изделий и снизить стоимость их обслуживания [1 – 4]. Кроме того, ПКМ все чаще при-

меняют при ремонте металлических и бетонных конструкций [5, 6]. В связи с тем, что сроки эксплуатации многих сооружений исчисляются десятками лет, к настоящему моменту опыт длительного использования в реальных условиях конструкций из ПКМ накоплен недостаточный [7 – 9]. Это стимулирует разработку методов ускоренного испытания материалов на термо-влажностное и климатическое старение, направлен-

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, Москва, Россия;
e-mail: alexshimkin@gmail.com; shimkinaa@viam.ru