

ТЕРМОМАГНИТНАЯ ОБРАБОТКА ИЗДЕЛИЙ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ

Пудов В.И., Драгошанский Ю.Н. Соболев А.С.

Институт физики металлов УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия.

pudov@imp.uran.ru

Введение

Конструкционные стали широко используются в промышленности (ГОСТ 2590–88, 8479–70). Изучение их структуры является необходимым этапом для перспективного повышения их физико-механических свойств.

Ранее разработанные металлургические способы совершенствования свойств данных сталей – выбор основного химического состава, оптимального размера кристаллического зерна, удаление вредных примесей и т.д., к настоящему времени практически исчерпали себя, поэтому требуются новые подходы для решения задач совершенствования их структуры и физико-механических свойств. Одно из этих направлений связано с термомагнитной обработкой (ТМО) изделий, изготавливаемых из этих сталей.

Материалы и методика эксперимента

В качестве образцов рассматривались изделия, изготавливаемые из конструкционной стали марки 40Х.

Термомагнитную обработку изделий осуществляли в рабочем объеме установки, обеспечивающей получение соответствующих результатов при независимом регулировании постоянных магнитных полей до 20 кА/м и температур до 1000–1200°С. Напряженность магнитного поля определялась из соотношения

$$H = K_c \cdot I_c,$$

где K_c – постоянная соленоида (1/м); I_c – величина постоянного тока, протекающего через витки соленоида.

Постоянную соленоида $K_c=66$ 1/м определяли магнитометром Ш1-8 с погрешностью не более 5 %. Величину постоянного тока соленоида на уровне 1000 А измеряли шунтом 75ШСММ3–1500–0,5 класса точности 0,5. Температуру в рабочем объеме определяли хромель-алюмелевой термопарой с погрешностью не более 5 %.

Исследовались образцы в виде стержней марки М10 (ГОСТ 22042–76), полученные, в частности, при закалке 860°С в масле, отпуск 2-х кратный 500°С, 1ч [1].

Образцы в количестве трех штук помещались в рабочий объем соленоида установки с ориентацией их продольных осей по направлению аксиальной (продольной) компоненты магнитного поля намагничивающей системы.

Параметры режимов ТМО варьировались по температуре выдержки в диапазоне от 500 до 700°С, время выдержки – от 15 минут до 3-х часов. Общим в этих режимах был нагрев со скоростью 5–10°С/мин при постоянном магнитном поле напряженностью $H \sim 65$ кА/м, разной временной выдержке в этом поле и медленное со скоростью 3–5°С/мин охлаждение в поле до температур $\sim 150^\circ\text{C}$, отключение поля и последующее охлаждение образца до комнатной температуры в установке.

Полученные результаты для образцов из стали 40Х, оценивали по изменению ударной вязкости стандартным методом при помощи маятникового копра [2].

Для всех образцов выполнялись контрольные эксперименты – дополнительная термообработка без воздействия магнитного поля при температуре и времени выдержки для найденного оптимального режима термомагнитной обработки изделий.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Из анализа представленных в таблице результатов ТМО образцов из конструкционной стали марки 40X следует, что оптимизация параметров ударной вязкости для данных размеров стяжных шпилек обеспечивается в узком диапазоне температур $t_s=540-560^\circ\text{C}$ и в достаточно ограниченном интервале времени выдержки τ_s , соответствующем 1,5 часам. При найденном режиме ТМО происходит в 2,8 раза увеличение ударной вязкости материала образцов (относительно принятой нормы КСИ) без изменения их твердости, приобретённой при стандартной термической обработке.

При внешнем осмотре поломанных при испытании образцов наблюдался матовый вид излома, поверхность разрушения содержала уступы – волокна, что характерно для вязкого разрушения [2].

Известно, что легированные хромистые стали склонны, при медленном охлаждении в диапазоне температур $450-600^\circ\text{C}$, к обратной отпускной хрупкости. Возникновение этой хрупкости связано с диффузией вредных примесей (серы, мышьяка и, в особенности, фосфора [2, 3]) к границам зерна без выделения мелкодисперсных фаз (карбидов, фосфатов и других соединений). При этом легирующие элементы, например, хром и марганец, входящие в состав стали марки 40X, дополнительно способствуют обогащению пограничных зон фосфором и серой, что увеличивает вероятность хрупкого разрушения [4].

Наблюдаемое повышение ударной вязкости (при сохранении твердости образца) в области температур возникновения обратной отпускной хрупкости, можно объяснить несколькими механизмами, один из которых обусловлен перераспределением примесей по границам зерен легированного мартенсита в условиях восходящей диффузии, вызванной магнитным полем.

Таблица 1. Зависимость ударной вязкости КСИ (МДж/м^2) от режима ТМО в продольном магнитном поле $H \cong 65$ кА/м образцов, вырезанных из стяжных шпилек М10 (сталь 40X, исходные КСИ $\cong 0,6$ МДж/м^2 и твердость ~ 290 НВ при $t = 500^\circ\text{C}$).

Температура выдержки, $t_s, ^\circ\text{C}$	Время выдержки τ_s		
	1 ч	1,5 ч	3 ч
500	1	1,3	1,4***
550*	1,4	1,7*	1,5***
700	2,0***	–	–
550**	–	0,6**	–

* – оптимальный режим; ** – контрольная ТО в отсутствии воздействия магнитного поля; *** – снижение твердости до 200 НВ.

Перераспределение примесей происходит следующим образом. В условиях восходящей диффузии примеси будут концентрироваться по приграничным слоям зерен, параллельным оси образца, вдоль которой приложено магнитное поле. В результате происходит очищение от примесей приграничных слоев зерен в плоскостях, перпендикулярных оси образцов, что приводит к подтверждаемому экспериментом повышению сопротивления материала к поперечным сдвиговым деформациям, создаваемым в условиях эксплуатации изделий.

Очевидно, что данное перераспределение примесей и создание определенной концентрации в направлении воздействующего магнитного поля, формирует уже другой механизм сопротивления материала к поперечным сдвиговым деформациям, обусловленный снижением подвижности границ зерен в этом направлении.

Как показывают полученные при контрольных экспериментах результаты (см. таблицу), дополнительная термообработка образцов в отсутствии воздействующего на них магнитного поля, не приводит к повышению их ударной вязкости.

Общее количество обработанных стержневых шпилек, подвергнутых испытанию, составило ~ 30 штук, в том числе по оптимальному режиму ~ 10 штук. Ударная вязкость КСИ (мДж/м^2) контрольных образцов, соответствующая установленной норме ГОСТа, определяемой величиной КСИ $\cong 0,6 \text{ МДж/м}^2$, принималась за единицу.

Сравнение результатов ТМО стержневых шпилек М10 с ранее полученными результатами при ТМО М16, показывают их различие в режимах обработки. То есть нахождение эффективного режима обработки зависит от установления соответствующего режима обработки для каждого размера образца.

В работе [3] приведены результаты ТМО закаливаемых образцов диаметром 5 мм из конструкционной стали марки 40Х в условиях приложенного постоянного магнитного поля напряженностью $H=0,8 \text{ МА/м}$ и циклической обработки по сложному режиму с возможностью перехода температуры обработки через точку Кюри в область температуры аустенизации 860°С . Эффект составил ~15 %. Сравнение этих результатов с полученными при обработке стержневых шпилек показывает, что применение термомагнитной обработки после полного цикла стандартной термообработки изделий, дает более высокий результат при применении относительно малой величины магнитного поля ($H=65 - 70 \text{ кА/м}$), нежели при закалке или отпуске изделий.

Заключение

Установлено в результате исследования влияния ТМО на свойства изделий в виде стержневых шпилек М10, изготовленных из конструкционной стали 40Х, что под воздействием магнитного поля формируется в ортогональных плоскостях многофазных сплавов разная структура, изменяющая физико-механические свойства образцов. Данный эффект проявляется в узком диапазоне температур при определенных величинах времени выдержки и напряженности воздействующего магнитного поля. Он также зависит от размеров и конфигурации обрабатываемых материалов и изделий.

Использование оптимальных режимов термомагнитной обработки на практике обеспечивает заметное улучшение физико-механических свойств изделий из легированной стали, в частности, без изменения твердости, приобретённой при стандартной термической обработке изделий из стали 40Х, повышена их ударная вязкость в 2,8 раза.

Хотя эффект термомагнитной обработки обусловлен многообразием механизмов, требующих дальнейших их исследований, однако полученные в работе результаты дают новые представления о возможностях ТМО, позволяют эффективно реализовать резервы для долговременной эксплуатации изделий из легированных сталей.

Работа частично поддержана проектом РФФИ № 11-02-00931 и инициативным проектом УрО РАН №12-У-2-1018.

Список литературы

1. Марочник сталей и сплавов. Под. ред. Сорокина В.Г. – М.: Машиностроение, 1989. – 640с.
2. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение. – М.: Машиностроение, 1990. – 328 с.
3. Бернштейн М.Л., Пустовойт В.Н. Термическая обработка стальных изделий в магнитном поле. – М.: Машиностроение, 1987. – 256с.