

Список литературы

- ГОСТ 5632-72. Стали высоколегированные и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки и технические требования. // М.: Издательство стандартов, 1975. – 49с.
- Химушин Ф.Ф. Нержавеющие стали. // М.: Металлургия, 1967. – 242 с.
- Стрекалов О.И. Прочность сварных конструкций в агрессивных средах. // М.: Машиностроение, 1976. – 200 с.
- Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справочник. Кн. 2. Под ред. Клюева В.В. // М.: Машиностроение, 1976. – 328 с.
- Химченко Н.В., Бобров В.А. Неразрушающий контроль в химическом и нефтяном машиностроении. // М.: Машиностроение, 1978. – 264 с.
- Есилевский В.П., Пеликан А.Г., Еремеева И.Ю. Магнитный ферритометр ФМ-2. // Дефектоскопия. 1971. № 6. С. 123–124.
- Веденёв М.А., Пономарёв В.С., Кулеев В.Г и др. Прибор для контроля изменений магнитного состояния листов слабомагнитных аустенитных сталей – ферритометр Ф-01. // Дефектоскопия. 1994. № 3. С. 3–9.
- Ригмант Б.М., Горкунов Э.С., Пономарев В.С. и др. Измеритель содержания ферритной фазы – ферритометр ФМ-3. // Дефектоскопия. 1996. № 5. С. 78–83.
- Пудов В.И., Ригмант М.Б. О повышении эффективности определения ферромагнитных включений в сталях аустенитного класса. // Дефектоскопия, 2002, №5, с. 41-45.
- Туровский Я. Техническая электродинамика. // М: Энергия, 1974. – 488 с.
- Пудов В.И. К вопросу балансировки дифференциального феррозондового преобразователя. // Дефектоскопия. 1997. № 11. С. 33–36.
- Пудов В.И. О компенсации неидентичности коэффициентов преобразования магниточувствительных элементов феррозонда. // Дефектоскопия. 1999. № 1. С. 19–31.
- Пудов В.И., Жаков С.В. О компенсации ложного сигнала, обусловленного неколлинеарностью магнитных осей дифференциального магнитомодуляционного преобразования. // Дефектоскопия. 2000. № 7. С. 15–28.

УДК 666.517.2

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СТАЛИ ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ

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

Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург

Получение высокопрочных, устойчивых к эксплуатационным воздействиям изделий из инструментальной быстрорежущей стали является одной из важнейших задач современного металлостроения. Одно из направлений решения данной задачи связано с термомагнитной обработкой (ТМО) [1, 2].

Применение ТМО в процессе производства сталей не обеспечило получение надежно воспроизводимых и значимых для практики результатов [3]. Это можно объяснить относительно малой по энергии магнитной составляющей в сравнении с энергией основных процессов. Так для магнитного поля с $H = 10$ МА/м его энергетическая составляющая не превышает 1 % от энергии γ - α - перехода, имеющего место при закалке стали, процессов распада мартенсита и образования карбидов, происходящих при отпуске стали [1, 3].

Однако нами обращено внимание на возможность улучшения физико-механических свойств изделий, для которых основные высокоэнергетические процессы завершены, при их стандартной термической обработке (ТО), включая, например, заключительную стадию – отпуск.

Целью работы является оценка влияния величины магнитного поля при разных режимах термомагнитной обработки изделий, изготовленных из инструментальной быстрорежущей стали марки P6M5, предварительно подвергнутых полному циклу стандартной термообработки.

Образцы и методика эксперимента

Исследования проводились в диапазоне температур, не превышающих температуру Кюри быстрорежущей стали P6M5 и обеспечивающих протекание развитых диффузионных процессов и исключение процессов обезуглероживания образцов при их выдержке в условиях воздействия достаточно высокой температуры.

В качестве образцов использовали: метчики M5 ($L/D \sim 10$) и для продольных резов режущие пластины толщиной 5 мм с размерами верхнего квадрата 15x15 мм и нижнего квадрата 10x10 мм. Данные образцы были изготовлены из быстрорежущей стали марки P6M5 и прошли стандартную термообработку при закалке 1210–1230 °C с 2–5 минутной выдержкой и охлаждением в масле, отпуск трехкратный 540–560 °C с выдержкой 1 час [4]. Их твердость по HRC была не менее 63.

В этом случае структура стали, после закалки состоит из высоколегированного мартенсита, который содержит 0,3–0,4 % углерода, из избыточных нерастворенных карбидов и остаточного аустенита. Согласно работе [5], количество остаточного аустенита после закалки стали P6M5 составляет 28 ± 4 %, после первого отпуска – 13 ± 3 %, после второго отпуска – 6 ± 1 %, после третьего отпуска – 3 ± 1 %.

Влияние остаточного аустенита на сталь связано с понижением её режущих свойств, поэтому его присутствие в уже изготовленных изделиях является недопустимым.

Образцы (метчик или режущие пластины в комплекте из трех штук) помещались в рабочий объём установки с ориентацией их продольных осей (в направлении режущей кромки) по направлению аксиальной (продольной) компоненты магнитного поля намагничивающей системы. Параметры режимов ТМО варьировались по температуре выдержки в диапазоне от 500 до 700 °C, по времени выдержки – от 15 минут до 4-х часов. Общим в этих режимах был нагрев со скоростью 5–10 °C/мин в постоянном магнитном поле напряженностью $H \sim 40, 65, 80, 120$ кА/м, выдержка в этом поле в течение определенного времени и медленное, со скоростью 3–5 °C/мин, охлаждение в поле до температур ~ 150 °C, отключение поля и последующее охлаждение образца до комнатной температуры в установке.

Эффективность обработки образцов из стали марки P6M5 оценивалась в производственных условиях разных предприятий по изменению величины относительной износостойкости материала, которая для установленной нормы принимается за единицу. Для исследуемых образцов были выполнены контрольные эксперименты – дополнительная термообработка без магнитного поля при температуре и времени выдержки найденных оптимальных режимов.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

В представленной табл. 1 приведены полученные результаты термомагнитной обработки образцов из стали P5M5. Из них анализа следует, что оптимизация параметров относительной износостойкости для данных метчиков M5 обеспечивается в узком диа-

пазоне температур $t_s = 540\text{--}560\text{ }^\circ\text{C}$ и в достаточно ограниченном интервале времени выдержки τ_s , соответствующем 30–45 минутам. При найденном режиме термомагнитной обработки происходит повышение износостойкости данных изделий в 1,8–2 раза без изменения их твердости, приобретённой при режиме стандартной термической обработки.

Таблица 1. Зависимость относительной износостойкости (условные единицы) от режима обработки изделий в виде метчиков М5 в продольном магнитном поле $H \sim 65\text{ кА/м}$

Температура выдержки $t_s, ^\circ\text{C}$	Время выдержки $\tau_s, \text{ч.}$				
	0,2	0,5	1	2	4
500	1,4	1,6	1,5	1,4	1,2
560*	1,5	1,8*	1,7	1,6	1,3
600	1,3	1,4	1,3	1,1	0,7
700	1,1	1,2	0,7	-	-
560**	-	1,1	-	-	-

* – оптимальный режим;

** – контрольный эксперимент в отсутствии воздействующего магнитного поля.

Отметим, что температура обработки и времена выдержки, обеспечивающие оптимизацию ТМО, согласуются с расчетными величинами, полученными из модели восходящей диффузии примесей, в частности, на примере перераспределения фосфора в условиях воздействующего магнитного поля напряженностью $H \sim 65\text{--}70\text{ кА/м}$ [6].

Данная модель позволяет качественно объяснить один из механизмов улучшения физико-механических свойств легированных сталей при их термомагнитной обработке. Перераспределение примесей происходит следующим образом. В условиях восходящей диффузии примеси (фосфор, сера и другие), формирующие отпускную хрупкость, будут концентрироваться по приграничным слоям зерен, параллельным оси образца, вдоль которой направлено воздействующее магнитное поле. В результате происходит очищение от примесей приграничных слоев зерен в плоскостях, перпендикулярных оси образцов. Это приводит к подтверждаемому экспериментом повышению сопротивления материала к поперечным сдвиговым деформациям, создаваемым в условиях эксплуатации изделий.

Как показывают полученные при контрольных экспериментах результаты, представленные в таблице, дополнительная термообработка метчиков в отсутствии воздействующего на них магнитного поля, то есть четвертый отпуск, не приводит к повышению относительной износостойкости изделий.

Приведенные в таблице результаты являются максимальными по величине и подтверждены актами производственных испытаний. В зависимости от исходного состояния материала образцов, результаты при их эксплуатационных испытаниях могут изменяться в пределах $\pm 10\text{--}15\%$.

Таблица 2. Зависимость относительной износостойкости (условные единицы) изделий в виде метчиков М5 от обработки в разных магнитных полях при температуре $t_s 560^\circ\text{C}$.

Напряженность магнитного поля $H\text{ кА/м}$	Время выдержки $\tau_s, \text{ч.}$				
	0,2	0,5	1	2	4
40	1,1	1,3	1,4	1,5	1,3
65	1,5	1,8*	1,7	1,6	1,3
80	1,4	1,6	1,5	1,4	1,2
120	1,4	1,5	1,3	1,2	1,1

Как показывают представленные в табл. 2 результаты обработки метчиков в разных магнитных полях при оптимальной температуре и времени выдержки ($t_b = 560^\circ\text{C}$, $\tau_b = 0,5$ ч), оптимально подобранная величина магнитного поля приводит к повышению относительной износостойкости изделий.

Результаты исследования влияния магнитного поля на режущих пластин (прямоугольной формы) для продольных резцов показали, что при найденном режиме, определяемом параметрами $t_b = 560^\circ\text{C}$, $\tau_b = 45$ мин, обеспечивается повышение относительной износостойкости данных изделий \sim в 1,5 раза.

Испытания образцов – режущих пластин резцов проводились на токарном станке (модель 16К20) при различных режимах обработки заготовок, изготовленных из углеродистой стали 45. Они имели цилиндрическую форму, диаметр 250 мм, длину 550 мм. Режим обработки изделий изменялся числом оборотов шпинделя $n = 100; 125; 160$ об/мин и величиной подачи $S = 0,15; 0,2; 0,3$ мм/об (при одинаковой глубине резания – 0,5 мм).

При рекомендуемых в производстве режимах токарной обработки заготовок 100/0,15; 125/0,2; 160/0,2 износ образцов, подвергнутых ТМО, составил, в среднем, 0,23; 0,3; 0,33 мм, соответственно.

Полученные при контрольном эксперименте результаты дополнительной термообработки режущих пластин резцов в количестве трех исходных штук (т.е. обработки без воздействия на них магнитного поля), показали отсутствие повышения относительной износостойкости изделий при режимах 100/0,15 и 125/0,2, а при режиме 160/0,2 наблюдался их катастрофический износ. При исследовании образцов, подвергнутых стандартной термической обработке по ГОСТу, износ при данных режимах токарной обработки составил, в среднем, соответственно, 0,35 мм; 0,42 мм; 0,53 мм.

Сравнение вышеприведенных результатов с полученными результатами при ТМО метчиков показывает, что время выдержки дополнительно зависит от геометрических размеров образца. В тоже время, форма образцов (и связанный с ней размагничивающий фактор) оказывает влияние на определение оптимального режима термомагнитной обработки изделий.

В работах [3, 5] приведены результаты ТМО образцов – сверл диаметром 6 мм, изготовленных из стали марки P5M5. Их термомагнитная обработка осуществлялась после стандартной закалки при отпуске в режиме, определяемом параметрами $t_b = 560^\circ\text{C}$, $\tau_b = 1$ ч, и в постоянном магнитном поле напряженностью $H \sim 1440$ кА/м. Повышение относительной износостойкости сверл в 1,5 раза получено при их испытании в условиях сквозного сверления на станке (модель 2A135) планок из стали 12ХНЗА толщиной 30 мм.

Сравнение уже этих результатов с полученными результатами при ТМО метчиков показывает, что применение ТМО после полного цикла стандартной термообработки изделий, дает более высокий результат повышения их относительной износостойкости при относительно малом магнитном поле ($H \sim 65 - 70$ кА/м), нежели при закалке или отпуске изделий.

На рис. 1 и 2 представлены металлографические шлифы структур метчиков М5 из стали P6M5, сформированные после стандартного вида ТО и после ТМО.

Из анализа данных рисунков следует, что при стандартном виде ТО формируется структура с неравномерным распределением вторичных мелкодисперсных и частично коагулированных карбидов типа M_2C (Mo_7C) и MC ($V-C$), а также из единичных представителей первичных угловатых карбидов. При ТМО формируется два вида структур. В направлении воздействующего магнитного поля происходит измельчение структуры с образованием вторичных мелкодисперсных карбидов равномерно распределенных по границам зерен и в объеме, и неизменяемые единичные представители первичных угловатых карбидов. В поперечном сечении образца, где отсутствует влияние магнитного

поля, формируется структура соответствующая стандартному виду термической обработки.

В заключение отметим, что представленные результаты исследования ТМО образцов, изготовленных из инструментальной быстрорежущей стали марки Р6М5, подтверждают полученные из магнитостатической модели восходящей диффузии примеси фосфора расчетные данные [5], в частности, узкий диапазон температур и времен выдержки. Это позволяет без трудоемких поисковых исследований предварительно оценивать параметры эффективных режимов обработки материалов.

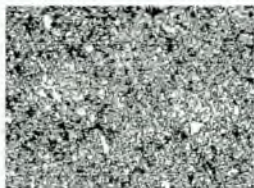


Рис. 1. Шлиф структуры метчика М5 после ТМО, сделан при $\times 600$ вдоль продольной оси образца ($1\text{ см} = 16\text{ мкм}$)



Рис. 2. Шлиф структуры метчика М5 после ТМО, сделан при $\times 600$ вдоль продольной оси образца по направлению воздействия поля ($1\text{ см} = 16\text{ мкм}$)

При исследовании установлено, что время выдержки в условиях термомагнитной обработки дополнительно зависит от геометрических размеров образца. Причем форма образцов (и связанный с ней размагничивающий фактор) оказывает влияние на определение оптимального режима термомагнитной обработки изделий.

Термомагнитная обработка наиболее эффективна в случаях, когда образцы прошли полный цикл стандартной термообработки.

Использование эффективных режимов ТМО на практике обеспечивает заметное улучшение физико-механических свойств (например, износостойкости \sim в 1,5–1,8 раза) изделий, изготовленных из инструментальной быстрорежущей стали марки Р6М5, без изменения их твердости, приобретённой при стандартной термической обработке.

Таким образом, данные результаты исследования дают новые представления о возможностях ТМО, открывают перспективу существенного улучшения физико-механических свойств изделий из легированных сталей, что имеет непосредственное практическое значение для производства.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 05-02-17704, 06-02-17082, 07-02-96032) и УрО РАН (проект № 22).

Список литературы

1. Кривоглаз М.А., Садовский В.Д., Смирнов Л.В. и др. Закалка стали в магнитном поле. М.: Наука, 1977. 119 с.
2. Гаврилов Г.М. Изменение свойств закаленной стали в магнитном поле. // *Металловедение и термическая обработка металлов*: 1977, №6. С. 18–22.
3. Бернштейн М.Л., Пустовойт В.Н. Термическая обработка стальных изделий в магнитном поле. М.: Машиностроение, 1987. 256 с.
4. Сорокин В.Г. Марочник сталей и сплавов. М.: Машиностроение, 1989. 640 с.
5. Пустовойт В.Н., Блиновский В.А. Термическая обработка в магнитном поле стали Р6М5. // *Металловедение и термическая обработка металлов*: 1983, №11. С. 52–54.
6. Пудов В.И., Соболев А.С. Оптимизация физико-механических свойств поликристаллических многокомпонентных ферромагнитных материалов термомагнитной обработкой. Ч. 2. Термомагнитная обработка легированных сталей. // *Физика и химия обработки материалов*: 2004, №5. С. 94–97.