

Магнитные и электромагнитные методы

УДК 620.179.14

МАГНИТНЫЕ, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ 38ХГНМ ПОСЛЕ ЗАКАЛКИ И ОТПУСКА

И. А. Кузнецов, Н. М. Скрипова, Ю. В. Царенко

Исследованы магнитные, электрические, термоэлектрические и механические свойства стали 38ХГНМ в зависимости от различных режимов закалки и отпуска. Влияние изменения химического состава (в пределах марки) на физические свойства и условия контроля закалки и отпуска рассмотрено путем определения магнитных параметров, таких как релаксационная коэрцитивная сила и остаточная индукция, полученная после частичного размагничивания изделий переменным или постоянным полем из состояния с максимальной остаточной намагниченностью.

В настоящее время проверка качества термической обработки деталей из стали 38ХГНМ чаще всего осуществляется путем измерения твердости методом Роквелла. Нами исследовано влияние различных режимов термической обработки и изменений химического состава (в пределах марки) на «классические» магнитные параметры и электрические свойства стали, а также на релаксационную коэрцитивную силу и остаточную индукцию образцов после частичного размагничивания переменным или постоянным магнитным полем из состояния с максимальной остаточной намагниченностью.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Исследовали сталь марки 38ХГНМ двух плавок, химический состав которых приведен в табл. 1. Образцы размерами $11 \times 11 \times 65$ мм изготавливали из отожженных прутков в состоянии заводской поставки. Их однородность проверяли, измеряя коэрцитивную силу. Образцы делили на три группы, каждую из которых подвергали закалке и отпуску. Образцы первой группы нагревали под закалку от различных температур в соляной ванне с выдержкой 15 мин. Закалку производили в масле температурой 40°C . Закаленные образцы шлифовали до размеров $10,1 \times 10,1 \times 64$ мм для удаления возможного обезуглероженного слоя. После изучения физических свойств образцы отпускали при 550°C с выдержкой 1 ч и последующим охлаждением на воздухе.

Таблица 1

Химический состав стали 38ХГНМ, вес. %

Плавка	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo
1	0,40	0,80	0,32	0,38	0,50	0,24
2	0,42	0,90	0,26	0,55	0,66	0,25

Образцы второй и третьей групп нагревали под закалку до 860°C , затем образцы второй группы отпускали при различных температурах, а третьей — при 575°C с различной выдержкой, после чего их шлифовали до размеров $10 \times 10 \times 64$ мм.

В исходном состоянии, после закалки и после отпуска на образцах измеряли следующие характеристики: коэрцитивную силу H_c ; релаксационную коэрцитивную силу тела H_r (ГОСТ 19693—74); намагниченность насыщения M_s ; относительную максимальную магнитную проницаемость μ_{max} ; поле максимальной магнитной проницаемости $H_{\mu_{max}}$; остаточную индукцию B_d ; остаточную индукцию B_{d-} и тангенциальную составляющую поля рассеяния на поверхности образца H_{0-} — после выключения обратного поля с заданных точек нисходящей ветви гистерезиса; остаточную индукцию B_{d-} и тангенциальную составляющую поля рассеяния на поверхности образца H_{0-} — после частичного размагничивания переменным магнитным полем; удельное электросопротивление ρ ; термоэлектродвижущую силу E и твердость HRC .

После изучения магнитных, электрических свойств и твердости на тех же образцах определяли механические свойства. Чтобы найти ударную вязкость a_u , на образцах в соответствии с ГОСТ 9454—78 делали надрез глубиной 2 мм, шириной 2 мм, с радиусом закругления в вершине надреза 1 мм. Для определения условного предела текучести $\sigma_{0,2}$, временного сопротивления σ_v , относительного удлинения δ и относи-

тельного сужения ψ были изготовлены цилиндрические образцы расчетной длиной $l_0=25$ мм, диаметром $d_0=5$ мм (ГОСТ 1497—73). Металлографические свойства определяли по методике [1, 2].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Средние значения характеристик физических свойств стали 38ХГНМ в исходном состоянии, после закалки и отпуска приведены в табл. 2, 3 и на рис. 1—5.

В табл. 2 приведены данные, отражающие зависимость магнитных, электрических свойств и твердости стали от температуры ее закалки. Видно, что все изученные свойства, достигнув некоторого значения при температурах закалки 820° С, с дальнейшим повышением температуры практически остаются постоянными. Отпуск при 550° С образцов, закаленных от различных температур, сглаживает различие между закаленным и незакаленным состояниями (табл. 3). При этом снижаются H_c , $H_{u\max}$ (в 2 раза), H_r , B_d , ρ , HRC (в 2 раза) и увеличиваются μ_{\max} (в 3,5 раза), M_s , E . Однако в общем зависимость этих характеристик от температуры закалки после технологического отпуска сохраняется.

Таблица 2

Магнитные, электрические свойства и твердость стали 38ХГНМ
после закалки от различных температур
(над чертой — для плавки 1, под чертой — для плавки 2)

$T_{зак.}, ^\circ\text{C}$	$H_c, \text{ A}/\text{см}$	μ_{\max}	$M_s, \text{ A}/\text{см}$	$\rho, \text{ мкОм}\cdot\text{см}$	$E, \text{ мВ}$	HRC
Исходное состояние	7,9	580	16300	22,9	0,31	13,0
	7,7	630	16200	23,4	0,36	13,0
780	24,1	225	15300	29,1	0,20	43,0
	22,5	265	15400	29,3	0,28	40,0
800	32,3	230	15500	29,6	0,20	53,0
	31,9	230	15500	30,0	0,26	50,0
820	31,5	235	15600	29,6	0,20	53,5
	31,7	235	15600	30,1	0,28	52,5
840	32,0	235	15600	30,1	0,20	54,5
	31,9	235	15600	30,7	0,27	53,5
860	32,0	230	15600	30,3	0,22	54,5
	31,8	230	15600	31,6	0,27	54,5
880	31,4	235	15700	30,5	0,21	55,5
	31,5	235	15600	31,6	0,27	55,0
900	31,3	235	15700	30,5	0,22	55,0
	31,4	235	15600	31,7	0,28	55,0
950	30,6	235	15800	30,5	0,22	55,0
	30,6	235	15700	32,1	0,30	55,0

Изменение физических свойств закаленной стали в зависимости от температуры отпуска (рис. 1) можно качественно объяснить процессами, происходящими при отпуске: распадом мартенсита и аустенита, карбидными превращениями и коагуляцией карбидных фаз [1, 3]. Из рисунка видно, что однозначной связи между магнитными и механическими свойствами стали 38ХГНМ, отпущенной в широком диапазоне температур, нет. В узких интервалах температур отпуска такая связь имеется и существует возможность использовать магнитные характеристики для контроля качества изделий. Так, контроль отпуска до

450°С может проводиться по результатам измерений H_c , величина которой может быть легко найдена с помощью коэрцитиметров с приставными электромагнитами.

Контроль качества отпуска во всем диапазоне температур в принципе мог бы быть осуществлен на основе измерений удельного электросопротивления: ход кривых $\rho(T_{\text{отп}})$, снятых для определенной плавки, достаточно плавный. Но, к сожалению, колебания химического состава в пределах марки влияют на электросопротивление, что значительно затрудняет контроль по этому параметру.

Таблица 3

**Магнитные и механические свойства стали 38ХГНМ после закалки
от различных температур и отпуска при 550°С**
(над чертой — для плавки 1, под чертой — для плавки 2)

$T_{\text{зак}}$, °С	H_c , А/см	$Bd \cdot 10^4$, Тл.	M_s , А/см	HRC	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	a_1 , Дж/см ²
Исход. сост.	7,9	—	16300	13,0	637	549	26,0	64,0	52
	7,7	—	16200	13,0	617	539	22,0	67,0	104
780	9,3	340	16300	21,0	823	647	23,0	59,5	109
	8,9	320	16200	19,5	804	627	23,0	64,5	147
800	11,4	400	16300	28,0	—	—	—	—	126
	10,3	375	16200	27,0	931	853	19,0	64,5	144
820	10,8	400	16300	28,0	921	853	19,5	59,6	124
	10,6	380	16200	28,5	941	872	20,0	62,0	141
840	11,4	420	16300	29,0	960	882	19,5	59,0	120
	11,2	405	16200	28,5	960	892	20,4	62,0	146
860	11,8	430	16300	30,0	970	892	19,0	59,0	120
	11,8	430	16200	30,0	990	902	20,4	62,0	126
880	11,9	435	16300	30,0	990	892	20,0	59,0	122
	12,1	441	16200	30,5	—	—	—	—	119
900	12,0	440	16300	30,0	990	892	19,5	59,5	131
	12,4	450	16200	31,5	1009	921	19,5	64,0	119
950	12,1	440	16300	31,0	1019	892	20,0	61,5	136
	12,7	460	16200	32,0	1049	921	20,0	64,0	123

Качество высокотемпературного отпуска нельзя установить ни по одной из рассмотренных характеристик магнитных свойств, так как при температуре отпуска 450—650°С нет однозначного хода зависимости магнитных свойств от температуры. Поэтому для определения параметра неразрушающего контроля механических свойств стали 38ХГНМ в области средних и высоких температур отпуска (300—700°С) были проведены исследования необратимых процессов перемагничивания.

На рис. 2 приведена зависимость B_{d-} , $B_{d\sim}$ и B_d от температуры отпуска. Из семейства кривых $B_{d-}(T_{\text{отп}})$, построенных при определенных размагничивающих полях, видим, что с возрастанием величины H_c зависимость B_{d-} от $T_{\text{отп}}$ изменяется. Зависимость остаточной индукции B_{d-} и B_d от температуры отпуска (кривые 1, 2) при небольших размагничивающих полях близка к изменению коэрцитивной силы под влиянием температуры отпуска (см. рис. 1а и 2). По мере увеличения H_c максимум B_{d-} , наблюдающийся при $T_{\text{отп}}=550^\circ\text{C}$ уменьшается, а затем совсем исчезает. При определенных полях зависимость B_{d-} от $T_{\text{отп}}$ становится однозначной, как и для сталей, исследованных в [2, 4]. Наиболее сильно изменяется B_{d-} при низкотемпературном отпуске (100—300°С), затем снижение B_{d-} несколько замедляется.

Дальнейшее увеличение размагничивающего поля выше некоторого оптимального приводит к частичному перемагничиванию образцов по нисходящей ветви магнитного гистерезиса и зависимость B_{d-} от $T_{\text{отп}}$ опять становится неоднозначной при высокотемпературном отпуске (см. рис. 2, кривая 4). Аналогично изменяется остаточная индукция $B_{d\sim}$, полученная после частичного размагничивания образцов, находящихся в состоянии с максимальной остаточной индукцией B_d , переменным магнитным полем различной амплитуды.

Изменение характера зависимости H_c , B_d , B_{d-} , $B_{d\sim}$, H_r и HRC под влиянием температуры отпуска иллюстрирует рис. 3. Видно, что релаксационная коэрцитивная сила, остаточная индукция B_{d-} и $B_{d\sim}$ тела, имеющего достаточно большой размагничивающий фактор, монотонно

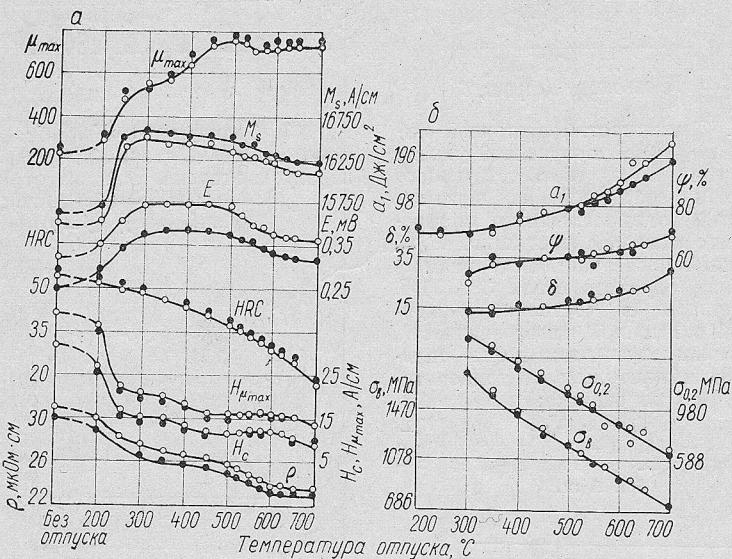


Рис. 1. Магнитные, электрические, термоэлектрические (а) и механические (б) свойства стали 38ХГНМ в зависимости от температуры отпуска (закалка от 860°С в масле):

● — плавка 1; ○ — 2.

убывают во всем интервале температур отпуска аналогично характеристикам прочности σ_b и $\sigma_{0,2}$ (см. рис. 1б). Монотонная зависимость B_{d-} и $B_{d\sim}$ от $T_{\text{отп}}$ определяется для каждого типа изделий путем подбора величины постоянного или переменного размагничивающего поля.

Следовательно, релаксационную коэрцитивную силу, остаточную индукцию B_{d-} и $B_{d\sim}$ можно рекомендовать для контроля качества закалки и последующего отпуска изделий из стали 38ХГНМ. В промышленных условиях измерять остаточную индукцию B_{d-} или $B_{d\sim}$ можно по величине полей рассеяния H_0 от изделия [2], пропорциональных этим индукциям (см. рис. 2—4). В качестве измерительного устройства может быть использован феррозондовый магнитометр [5].

На рис. 5 приведены зависимости релаксационной коэрцитивной силы, остаточной индукции B_{d-} и $B_{d\sim}$, тангенциальной составляющей полей H_{0-} и $H_{0\sim}$ от твердости термообработанных образцов. Видно, что для контроля твердости, также как и для характеристик прочности и пластичности (см. рис. 1б), изделий из стали 38ХГНМ можно рекомендовать феррозондовый магнитометр, как это отмечалось в [2, 4]. Изменения химического состава в пределах марки стали заметно не влияют на показания магнитометра.

Физические свойства стали 38ХГНМ, закаленной от 860°С, в зависимости от продолжительности отпуска при 575°С резко изменяются

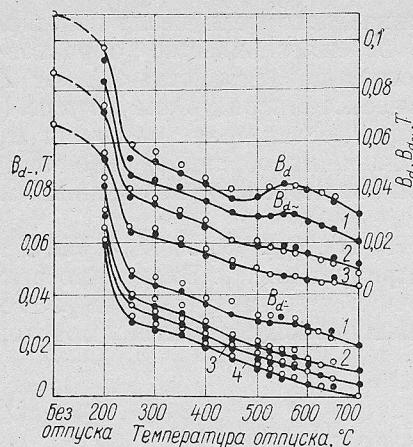


Рис. 2. Зависимость остаточной индукции B_d , $B_{d\sim}$, полученной после выключения поля, соответствующего магнитному состоянию на исходящей ветви петли магнитного гистерезиса, и остаточной индукции $B_{d\sim}$, полученной после частичного размагничивания образцов стали 38ХГНМ, находящихся в состоянии максимальной остаточной намагниченности, переменным магнитным полем определенной амплитуды, от температуры отпуска:

● — плавка 1; ○ — 2. $B_{d\sim}$ при H_c :
1 — 16,4; 2 — 32,8; 3 — 41,0; 4 — 49,2 A/cm;
 $B_{d\sim}$ при H_c : 1 — 18,5; 2 — 37,7; 3 — 66,5 A/cm.

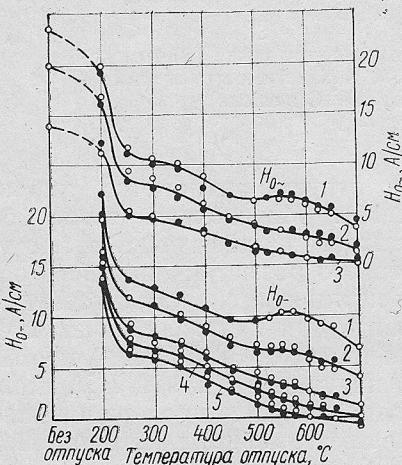


Рис. 4. Зависимость тангенциальной составляющей полей рассеяния, полученной после размагничивания образцов стали 38ХГНМ постоянным или переменным магнитным полем определенной величины из состояния с максимальной остаточной намагниченностью, от температуры отпуска:

● — плавка 1; ○ — 2. H_0 при H_c :
1 — 0; 2 — 16,4; 3 — 32,8; 4 — 41,0; 5 — 49,2 A/cm; H_0 при H_c : 1 — 18,5; 2 — 37,7; 3 — 66,5 A/cm.

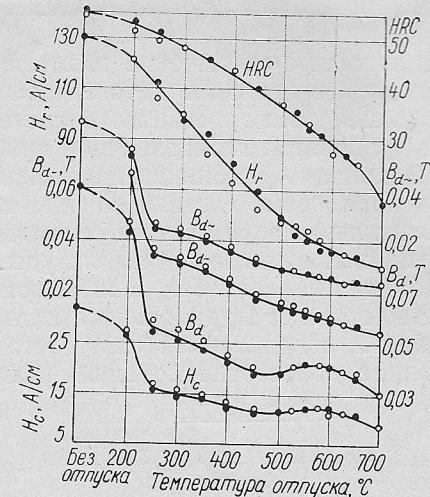


Рис. 3. Зависимость H_c , B_d , $B_{d\sim}$, H_r и HRC стали 38ХГНМ от температуры отпуска (закалка от 860°C, $H_c = 41$; $H_c = 66,5$ A/cm):

● — плавка 1; ○ — 2.

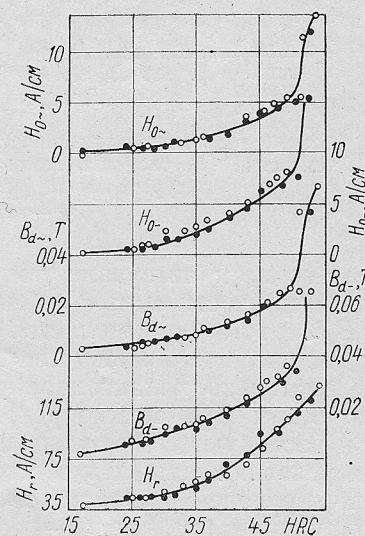


Рис. 5. Зависимость H_r , B_d , $B_{d\sim}$, H_0 , H_c от твердости образцов стали 38ХГНМ ($H_c = 41$; $H_c = 66,5$ A/cm):

● — плавка 1; ○ — 2.

в пределах 30-минутной выдержки, то есть в основном все процессы происходят при отпуске в первые 30 мин. При увеличении времени выдержки магнитные, электрические и механические свойства изменяются мало. Незначительные изменения удельного электросопротивления, термоЭДС, твердости, предела текучести и временного сопротивления можно объяснить продолжающейся коагуляцией карбидов, снятием упругих напряжений, рекристаллизацией феррита, образованием легированных карбидов, то есть процессами, связанными с диффузией.

ВЫВОДЫ

1. Релаксационная коэрцитивная сила и остаточная индукция после размагничивания изделий переменным или постоянным магнитным полем определенной величины из состояния с максимальной остаточной намагниченностью монотонно изменяются во всем интервале температур отпуска и могут быть использованы для контроля качества термической обработки изделий из стали 38ХГНМ.

2. Для промышленного контроля механических свойств изделий, отпущенных в широком температурном интервале, можно рекомендовать феррозондовый магнитометр, который позволяет измерять поля рассеяния, пропорциональные остаточной индукции несимметричного цикла.

3. Контроль качества закаленных и отпущеных до 450°С изделий может быть осуществлен путем измерения коэрцитивной силы или магнитной проницаемости. Для контроля высокотемпературного отпуска эти параметры неприменимы ввиду неоднозначной зависимости их от температуры отпуска.

4. Увеличение времени выдержки при отпуске изделий из стали 38ХГНМ более 30 мин практически не влияет на магнитные, электрические и механические свойства, то есть в основном все процессы при отпуске проходят в первые 30 мин.

Уральский госуниверситет
имени А. М. Горького

Поступила в редакцию
28 октября 1980 г.
в окончательном варианте —
12 февраля 1982 г.

ЛИТЕРАТУРА

- Кузнецов И. А., Сомова В. М. Электромагнитный контроль механических свойств изделий из сталей марок 50ХГ и 50ХФА. — Дефектоскопия, 1972, № 6, с. 40—51.
- Кузнецов И. А., Багров А. И., Радионова Л. Х., Сомова В. М. Магнитные, электрические и механические свойства стали 35СГМ после закалки и отпуска. — Дефектоскопия, 1978, № 7, с. 39—45.
- Морозова В. М., Михеев М. Н. Магнитные, электрические свойства закаленных и отпущеных углеродистых сталей. — Труды ИФМ АН СССР. Свердловск, 1965, вып. 24, с. 26—35.
- Михеев М. Н., Горкунов Э. С., Дунаев Ф. Н. Неразрушающий магнитный контроль закаленных и отпущеных изделий из низколегированных конструкционных и простых углеродистых сталей. — Дефектоскопия, 1977, № 6, с. 7—19.
- Кузнецов И. А., Петров Н. Н. Магнитометр импульсный феррозондовый. В кн.: Методы и средства измерения параметров магнитного поля. Л.: Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологии, 1980, с. 57.