

Электромагнитные методы

УДК 620.179.14

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ МИКРОСТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ХОЛОДНОДЕФОРМИРОВАННЫХ ТРУБ ИЗ СТАЛИ МАРКИ 12Х2МФСР

В. А. Бурганова, Л. В. Кохман, В. А. Кузьмина, Л. П. Чуканова

Исследовано влияние скоростей охлаждения после аустенизации на магнитные характеристики (H_c , $\mu_{\max}$, B_r , I_s), механические свойства (σ_b , σ_t , δ_5) и структуру стали 12Х2МФСР. Показана возможность определения процентного содержания феррита в структуре стали и механических свойств труб путем измерения магнитной проницаемости $\mu_{\max}$ или коэрцитивной силы H_c . Приводятся результаты испытаний, полученные при применении коэрцитиметра КИФМ-1 и магнате́ста Q фирмы Ферстера в промышленных условиях.

При неповреждающем контроле холоднодеформированных труб из стали марки 12Х2МФСР обращает на себя внимание существенная неоднородность их магнитных и механических свойств в нормализованном состоянии, обусловленная колебанием скорости охлаждения после аустенизации стали [1]. В данной работе детально исследовано это явление и дополнительно изучены свойства труб в отожженном состоянии, а также после закалки в масле.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ

Лабораторные испытания. Исследовали патрубки длиной $l=300$ мм, отрезанные от холоднодеформированных труб диаметром 32 мм с толщиной стенки 6,5 мм, изготовленных из стали трех плавок близкого химического состава. Патрубки проходили аустенизацию при 965 или 980°С с выдержками при нагреве 10 и 20 мин, затем отпуск при 750° в течение 2 ч с последующим охлаждением на воздухе. После аустенизации патрубки охлаждали в воде, масле, с печью и на воздухе. Средние скорости охлаждения патрубков до 300° составляли, град/мин: 1,5—2 (охлаждение с выключенной печью), 15—75 (охлаждение на воздухе индивидуально или в связанном пакете), 75—100 (обдувка струей воздуха от вентилятора). Скорость охлаждения определяли с помощью хромель-алюмелевой термопары, приваренной к средним участкам патрубков. При каждом варианте охлаждения испытано не менее 10 образцов. Равномерность распределения магнитных свойств по периметру и длине патрубков определяли при помощи коэрцитиметра КИФМ-1.

Промышленные испытания. Контроль труб с помощью магнате́ста и коэрцитиметра проводили в производственных условиях на специальном участке, оснащенном роликовыми дорожками и трубопротяжными механизмами. Размер полюса электромагнита коэрцитиметра 28×12 мм. Внутренний диаметр «проходных» катушек магнате́ста 50 мм, частота тока возбуждения 5 гц, скорость прохождения контролируемых труб через катушку 0,5—1 м/сек, длина неконтролируемого конца 0,5—0,7 м. Фазу разностного напряжения магнате́ста устанавливали таким образом, чтобы максимум кривых располагался на вертикальной центральной линии экрана измерительного блока. В зависимости от размера контролируемых труб изменяли размер эталона и величину тока, питающего первичные катушки (табл. 1). Испытывали трубы размерами: 32×6,5; 42×3,5; (42—45)×4,5 мм, прошедшие термическую обработку и правку на валково-правильном стане.

Для магнитоструктурного анализа вырезали сегменты длиной 270 мм, шириной 10 мм. Определение магнитных ($\mu_{\max}$, H_c , B_r , I_s) и механических (σ_b , σ_t , δ_5) свойств

Таблица 1

Размеры эталонов и величина тока возбуждения при испытании труб на магнетесте

Размеры труб, мм		Размер эталона, мм			Величина тока, а
Диаметр	Толщина стенки	Диаметр	Толщина стенки	Длина	
32	5,5—6,5	32	5,5	1000	1
42—45	3,5—4,5	45	4,5	1000	0,8

и металлографический анализ структуры осуществляли по методике, описанной в работе [2]. Расчет статистических характеристик (среднего значения измеряемой величины, стандартного отклонения S и вариационного коэффициента V) выполнен на ЭВМ «Минск-22».

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Аустенизация и охлаждение с различными скоростями. Структура патрубков, охлажденных после аустенизации с минимальной скоростью ($v_{\text{охл}}=1,5$ град/мин), состояла из феррита, отличающегося значительной разнотернистостью, и небольшого количества перлита (<5%). Образцы, вырезанные из этих патрубков, характеризовались минимальными значениями H_c , ρ , максимальными μ_{max} , B_r , I_s . Прочностные свойства σ_b , σ_T наиболее низкие, пластичность максимальна (табл. 2, 3). В микро-

Таблица 2

Пределы изменения показаний коэрцитиметра в зависимости от условий охлаждения после аустенизации

Условия охлаждения*		Показания коэрцитиметра, ма	Микроструктура
Скорость, град/мин	Среда		
1,5—2	Печь	17—20	Феррит и 5—10% перлита
15—75	Воздух	22—70	Бейнит и структурно-свободный феррит
75—100	Обдувка вентилятором	70—87	Бейнит
—	Масло	82—98	Мартенсит
—	Вода	85—110	»

* От 965—980° С с выдержкой 10—20 мин.

структуре патрубков, охлажденных со скоростью 15 град/мин, наблюдали недостаточное количество бейнита (<30%) и структурно-свободный феррит (рис. 1а). При увеличении скорости охлаждения от 20 до 75 град/мин количество феррита в структуре уменьшалось (рис. 1б), H_c , σ_b , σ_T увеличивались и δ_5 уменьшалось.

Падение I_s в этом диапазоне охлаждения объясняется появлением остаточного аустенита (~5—8%). Показания коэрцитиметра при испытании патрубков, закаленных в масле и в воде, почти одинаковы по значениям. При закалке в воде структура характеризовалась мартенситом (см. табл. 2). Размагничивающий ток для патрубков, закаленных в воде, в пять раз выше, чем для отожженных ($v_{\text{охл}}=1,5$ град/мин). При одинаковых условиях охлаждения существенных различий в микрост-

руктуре и свойствах патрубков после аустенизации при 965 и 980° и выдержках 10 и 20 мин не обнаружено.

Аустенизация при 980° (выдержка 20 мин), охлаждение с различными скоростями и высокотемпературный отпуск. Общие закономерности

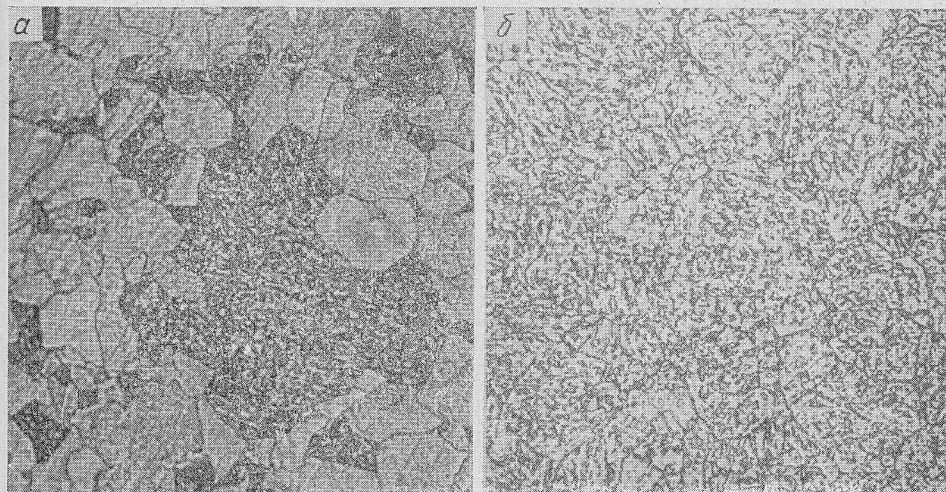


Рис. 1. Микроструктура стали 12X2МФСР после охлаждения от 980° с различными скоростями:

а — 15; б — 75 град/мин.

изменения физико-механических свойств после отпуска патрубков по сравнению с закаленным или нормализованным состояниями аналогичны описанным ранее [1]. Закалка в масле и в воде обеспечивала по-

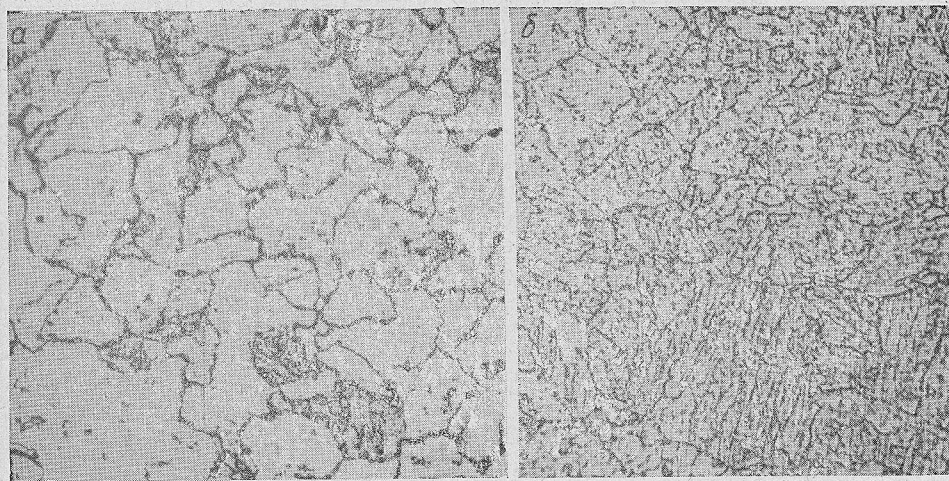


Рис. 2. Микроструктура стали после охлаждения от 980° и отпуска при 750° в течение 2 ч. Скорость охлаждения:

а — 15; б — 75 град/мин.

лучение одинаковых физико-механических свойств. Отпуск значительно сглаживал различия в свойствах патрубков, охлажденных после аустенизации с различными скоростями (см. табл. 3 и 4).

Таблица 3
Физико-механические свойства и микроструктура стали 12Х2МФР после охлаждения от 980°С (выдержка 20 мин) с различными скоростями

Скорость охлаждения, град/мин	Колич. структурно-свободного феррита, %	Размагничив. ток, ма	Электромагнитные свойства				Механические свойства			
			$\bar{H}_c$, э	$\bar{\mu}_{\max}$, эс/э	$\bar{B}_r$, эс	$\bar{I}_s$, эс	$\bar{\rho} \cdot 10^5$ ом·см	$\bar{\sigma}_B$, кг/мм ²	$\bar{\sigma}_T$, кг/мм ²	$\bar{\delta}_5$, %
1,5	<95	18	4,6	630	9500	1680	3,22	52	33	34
15	75	24	5,3	480	7100	1640	3,41	64	42	24
	40	30	6,9	390	7150	1600	3,43	72	45	23
20—50	{15	37	12,0	310	7200	1560	3,49	84	54	20
	5	48	15,7	250	7500	1550	3,48	88	62	19
55	2	60	19,4	220	7800	1540	3,49	92	64	19
75	0	73	23,8	160	7950	1540	3,54	91	64	18

Примечание. Максимальные отклонения от средних значений H_c , $\mu_{\max}$, B_r составили $\pm 5\%$ для I_s , ρ — $\pm 2\%$.

Таблица 4
Физико-механические свойства и микроструктура стали после охлаждения от 980°С с различными скоростями и высокотемпературного отпуска

Скорость охлаждения, град/мин	Колич. структурно-свободного феррита, %	Баллы шкалы структур	Показания коэрцитиметра, ма		Электромагнитные свойства				Механические свойства			
			до отпуса	после отпуса	$\bar{H}_c$, э	$\bar{\mu}_{\max}$, эс/э	$\bar{B}_r$, эс	$\bar{I}_s$, эс	$\bar{\rho} \cdot 10^5$, ом·см	$\bar{\sigma}_B$, кг/мм ²	$\bar{\sigma}_T$, кг/мм ²	$\bar{\delta}_5$, %
1,5	100	7	19	17	3,4	900	11 900	1680	3,25	50	32	31
15	90	6	24	20	4,2	840	12 600	1670	3,25	53	36	32
	{40—50	3—4	33	22	4,9	790	12 900	1680	3,22	55	38	28
20—50	{20—30	2	47	23	5,1	780	13 400	1670	3,17	60	41	29
	10—20	2	57	23	5,2	780	13 700	1680	3,16	61	43	28
55	0	1	69	24	5,4	770	14 000	1680	3,18	63	45	28
75												
Охлаждение в масле	0	1	91	26	6,0	720	14 300	1670	3,16	63	46	26

воз
рис
же
стр
пре
ско
(р
7 п
со
(р
и с
ни
но
ни
де

ТО
Ш
ВО

о

5—

H_c
4
5
5
5
6
6
6

и
в
т
в
н

После отпуска патрубков H_c , σ_b , σ_t , I_p уменьшались, $\mu_{\max}$, B_r , δ_5 возрастали. Количество феррита в их структуре увеличивалось (ср. рис. 1а и 2а). Меньше изменились электромагнитные свойства отожженных патрубков ($v_{\text{охл}}=1,5 \text{ град/мин}$), величина зерен феррита в их структуре увеличилась, механические свойства практически остались прежними. В структуре патрубков, охлажденных после аустенизации со скоростью 15 град/мин, содержалось не более 10% сорбита отпуска (рис. 2а), что соответствует nereкомендуемой структуре (баллы 6—7 шкалы структур Главтрубостали). Структура патрубков, охлажденных со скоростью 50—75 град/мин, состояла из отпущенного бейнита (рис. 2б) и оценивалась баллами 1—2. Сопоставление микроструктуры и физико-механических свойств патрубков показало, что при уменьшении количества феррита и увеличении дисперсности феррито-цементитной смеси в структуре стали 12Х2МФСР наблюдается рост H_c и падение $\mu_{\max}$ (см. табл. 4). Возрастание I_s до максимальных значений свидетельствовало о процессе распада остаточного аустенита при отпуске.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ

Как и при исследовании патрубков, термообработанных в лабораторных условиях, при появлении феррита в структуре стали H_c уменьшалась, $\mu_{\max}$ увеличивалась, прочностные свойства падали, пластичность возрастала (табл. 5, 6).

Таблица 5

Зависимость магнитных свойств от микроструктуры труб

Колич. образцов, шт.	Магнитные свойства			Количество участков сорбита, %	Микроструктура, баллы
	H_c , э	$\mu_{\max}$, гс/э	B_r , гс		
17	4,4—4,8	750—720	9800—11500	<30	5; 6
30	4,9—5,3	720—690	12000—13500	30—70	3; 4
127	5,4—6,8	690—580	11500—13000	70—100	1; 2

Примечание. Рекомендуемым структурам соответствуют баллы 1—4, nereкомендуемым—5—8. I_s исследованных образцов находилась в пределах 1630—1690 гс, $\rho=(3,18-3,51) \cdot 10^{-6} \text{ ом} \cdot \text{см}$

Таблица 6

Распределение образцов по H_c и средние значения механических характеристик

H_c , э	Колич. образцов, шт.	$\bar{\sigma}_b$, кг/мм ²	S , кг/мм ²	V , %	$\bar{\sigma}_t$, кг/мм ²	S , кг/мм ²	V , %	$\bar{\delta}_5$, %	S , %	V , %
4,8	8	59,5	3,1	5,2	45,2	2,6	5,8	27,4	2,2	8,0
5,1	23	62,2	2,6	4,2	49,0	2,3	4,7	26,4	1,3	4,9
5,4	31	63,3	2,1	3,3	49,2	1,8	3,7	26,2	1,0	3,8
5,7	20	63,0	1,9	3,0	49,5	2,1	4,2	26,0	1,0	3,8
6,1	16	65,4	2,1	3,2	51,3	1,9	3,7	25,4	1,6	6,3
6,4	13	66,0	2,6	3,9	51,5	2,8	5,4	22,8	1,4	6,1
6,7	5	67,0	3,2	4,8	52,3	2,7	5,2	22,4	1,9	8,5

Анализ результатов расчета средних значений механических свойств и коэрцитивной силы образцов, вырезанных из труб, позволил установить корреляционную зависимость между ними, представленную в табл. 6. Используя корреляционное соответствие, можно по измерению величины H_c в трубах осуществлять неповреждающий контроль механических характеристик металла. Точность определения механических

свойств магнитным методом не хуже точности, обеспечиваемой при стандартных испытаниях, которая по оценке, сделанной в [3], составляет 10–12%.

В результате промышленных испытаний труб с помощью магнате́ста и коэрцитиметра, исследований электромагнитных свойств и анализа микроструктуры получены данные для определения микроструктуры труб в соответствии с требованиями МРТУ—14—4—21—67 (табл. 7).

Зависимость показаний приборов от структуры труб

Таблица 7

Размеры труб, мм		Показания магнате́ста		Размагни- чивающий ток, ма	Микроструктура
Диаметр	Толщина стенки	Амплитуда, мм	Фаза, град.		
32	5,5	18—32	160—120	27—21	Рекомендуемая
		≥ 33	180—200	≤ 20	Нерекомендуемая
	6,5	20—34	160—200	26—20	Рекомендуемая
		≥ 35	170—200	≤ 19	Нерекомендуемая
42	3,5	10—32	30—150	39—27	Рекомендуемая
		≤ 9	80—100	≤ 26	Нерекомендуемая
42—45	4,5	10—25	140—170	34—25	Рекомендуемая
		≥ 26	150—180	≤ 24	Нерекомендуемая

Трубам с нерекомендуемой структурой, содержащей <30% сорбита отпуска, соответствуют наиболее низкие показания коэрцитиметра и наиболее высокие (при фазе=const) значения амплитуды разностного напряжения магнате́ста. Брак, обусловленный перегревом при высокотемпературном отпуске [1], в цеховых партиях труб не наблюдался. В то же время обнаружено не более 5% труб с рекомендуемой структурой, предел прочности которых превышал допустимые по нормам МРТУ значения ($\geq 75 \text{ кг/мм}^2$). Большая H_c и низкая $\mu_{\max}$ образцов, вырезанных из этих труб, позволяют предположить, что эти трубы были, вероятно, отпущены при температурах, ниже допустимых.

На показания магнате́ста влияет не только разница в толщине стенки исследуемой трубы и эталона, которая составляла 1 мм, но и допускаемое техническими условиями изменение толщины стенки трубы, равное $\pm 10\%$. Первая причина обуславливает несколько различающиеся показания прибора при оценке одинакового структурного состояния. Вторая — приводит к увеличению погрешности в определении амплитуды сигналов разностного напряжения на экране магнате́ста. Несмотря на это, границы между рекомендуемыми и нерекомендуемыми по структуре трубами устанавливались по показаниям магнате́ста с достоверностью не менее 90%, при помощи коэрцитиметра — не ниже 95%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Неповреждающий контроль микроструктуры труб из стали 12Х2МФСР рекомендуется осуществлять в два этапа: непосредственно после нормализации или закалки, а затем после отпуска. На первом этапе с высокой степенью надежности выявится структурный брак

($>70\%$ структурно свободного феррита), обусловленный малой скоростью охлаждения труб после аустенизации. Эти трубы из партии удаляются и высокотемпературному отпуску не подвергаются.

Перегрев при последующем отпуске может значительно ухудшить структуру аустенизированных труб вплоть до получения не рекомендуемой. Поэтому необходим контроль структуры труб после высокотемпературного отпуска (второй этап). При этом чувствительность магнитного контроля несколько ниже, вследствие уменьшения различий между рекомендуемыми и не рекомендуемыми структурами. Однако и на этом этапе достоверность контроля составляет $90-95\%$. Такая схема неповреждающего контроля микроструктуры труб является оптимальной, так как используется максимальная чувствительность, получающаяся при контроле труб непосредственно после аустенизации, и сокращаются непроизводительные расходы, связанные с ликвидацией затрат на термическую обработку безусловно бракованных труб.

Первоуральский
новотрубный завод

Поступила в редакцию
в окончательном варианте
10 октября 1973 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурганова В. А., Халилеев П. А., Кохман Л. В., Алешин В. А., Кириллов Н. П., Кузьмина В. А., Чемеринская Р. И., Чуканова Л. П. Дефектоскопия, 1971, № 4, 5.
2. Бурганова В. А., Кохман Л. В., Халилеев П. А., Кузьмина Л. П., Чуканова Л. П. Дефектоскопия, 1973, № 6, 42.
3. Кохман Л. В., Михеев М. Н. Дефектоскопия, 1969, № 5, 91.

УДК 620.179.14

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ТРУБ ПОДЗЕМНЫХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ (обзор¹)

П. А. Халилеев, П. А. Григорьев

Излагается содержание некоторых зарубежных статей и патентов, посвященных вопросам контроля нефте- и газопроводов, уложенных в грунт. Приводятся соображения авторов настоящего обзора о целесообразности использования тех или иных методов контроля. В итоге оказывается, что в ближайшее время следует ожидать наибольшего полезного эффекта от применения магнитных методов контроля; описаниям этих методов уделяется преимущественное внимание.

ВВЕДЕНИЕ

Громадная сеть подземных нефте- и газопроводов во всех промышленно развитых странах мира представляет собой систему жизненно важных артерий, которая должна функционировать безотказно, чтобы питаемый ею организм мог существовать.

¹ Этот обзор не претендует на полноту. Некоторые статьи и патенты, о существовании которых известно из реферативных журналов, нам еще не удалось получить; возможно, что еще больше источников пропущено. Поэтому авторы будут благодарны читателям за любые сообщения по рассматриваемому вопросу; эти сообщения мы просим направлять в редакцию журнала «Дефектоскопия».