



*The klasternyj mechanism of origin martensite with isothermal and athermal microkinetics is offered*

Г. В. СНЕЖНОЙ, Запорожский национальный технический университет,  
В. Л. СНЕЖНОЙ, В. И. МЕНЯЙЛО, Запорожский национальный университет

УДК 621.039

## КЛАСТЕРНЫЙ ХАРАКТЕР ЗАРОЖДЕНИЯ МАРТЕНСИТА С ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ И АТЕРМИЧЕСКОЙ МИКРОКИНЕТИКАМИ

**Введение.** Высокие механические свойства изделий достигаются благодаря образованию мартенсита – главной структурной составляющей закаленной стали и многих других сплавов железа. Проблему управления мартенситной реакцией можно решить на основании изучения природы зарождения мартенсита.

В работах [1,2] показано, что аустенит углеродных сплавов Fe–Cr–Ni (Cr–2%, Ni–15–26%, C–0,52%, Fe – все остальное) и сталей 43X2H19, 53H20 обусловлен присутствием в аустените маленьких ферромагнитных областей (кластеров), которые действуют зарождению кластеров мартенсита. В связи с этим возникает интерес исследовать магнитное состояние аустенита низкоуглеродных Fe–Ni сплавов и его влияние на зарождение мартенсита.

**Методика эксперимента и образцы.** Опыты проводили на магнитометрических весах [3]. Химический состав исследуемых сплавов приведен ниже.

Сплав	Состав, мас.%			
	C	Ni	Mn	Si
H15	0,05	15,1	0,41	0,35
H23	0,05	23,1	0,45	0,35
H25	0,04	25,0	0,40	0,38
H26.6	0,06	26,6	0,37	0,60
H27.3	0,05	27,3	0,39	0,49
H29	0,04	29,3	0,42	0,37
H31	0,02	31,2	0,28	0,35

Выплавленные сплавы в открытой индукционной печи проковывали в заготовки сечением 15×15 мм<sup>2</sup>, которые подвергали гомогенизирующему отжигу с последующей закалкой в воде. С цен-

тральной части вырезали образцы диаметром 2–4 мм, которые химически травили с целью снятия механических напряжений. Образцы нагревали в аргоне до 1120 К с выдержкой 3 мин, затем охлаждали в одинаковом режиме со скоростью, исключающей возможность диффузионного распада аустенита. При подходе к мартенситной точке  $T_S$  средняя скорость охлаждения составляла 1,1 К/мин.

Для определения довольно низкого содержания мартенсита, начиная с 0,005% и выше, использовали чувствительный магнитометрический метод [4].

**Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение.** На рис. 1 показаны типичные зависимости удельной магнитной восприимчивости  $\chi$  исследуемых образцов сплавов H15, H23, H25, H26.6, H27.3 в магнитном поле  $H = 0,2 \cdot 10^6$  А/м от температуры  $T$  и с последующей выдержкой соответственно в мартенситных точках  $T_S = 505, 446, 405, 307, 285$  К.

В сплавах H15, H23 и H25 в точках  $T_S$  возникает изотермическая микрокинетика, для которой характерно развитие мартенситной реакции со временем. В сплавах H26.6 и H27.3 в точках  $T_S$  наблюдаются первый и последующие скачки возникшего мартенсита и с дальнейшим понижением температуры после скачка мартенситное превращение (МП) со временем не развивается (горизонтальные площадки). Такой механизм МП в сплавах H26.6 и H27.3 соответствует атермическому превращению.

Характер обменного взаимодействия между магнитными атомами вещества можно оценивать по температурной зависимости ее магнитной восприимчивости. Для описания поведения магнит-

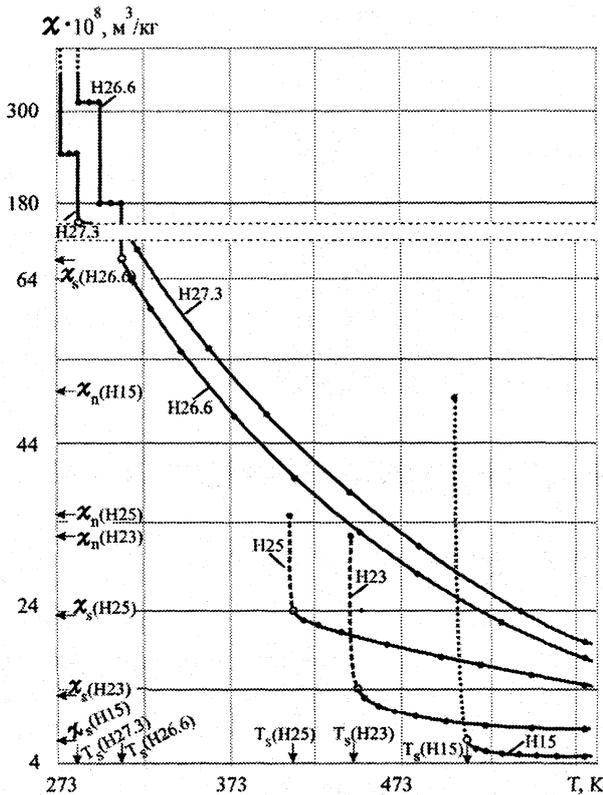


Рис. 1. Типичные температурные зависимости удельной магнитной восприимчивости  $\chi$  ( $H = 0,2 \cdot 10^6$  А/м) Fe – Ni-сплавов с выдержкой в точках  $T_s$ . Стрелками показаны стартовые (с индексом s) и конечные (с индексом n) значения  $\chi$  в точке  $T_s$

ной восприимчивости вещества в широком интервале температур использовали выражение [5]:

$$\chi^{-1} = \frac{T}{C} \left( 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\lambda_n}{T_n} \right), \quad (1)$$

где коэффициент  $\lambda_n$  – функция кристаллической структуры, магнитного момента атома и типа взаимодействия между моментами;  $n$  – целое число;  $C$  – константа.

Выражение (1) переходит в обычный закон Кюри – Вейса при  $n=1$ . Если  $n > 1$ , то зависимость  $\chi^{-1}(T)$  уже будет нелинейной. Форма кривой  $\frac{C}{\chi T} \left( \frac{1}{T} \right)$ , которая определяется уравнением (1), чувствительна к типу обменного взаимодействия между атомами.

На рис. 2 показаны теоретические зависимости  $\frac{C}{\chi T} \left( \frac{T_c}{T} \right)$  ( $T_c$  – температура Кюри) для разных случаев обменного взаимодействия между магнитными атомами вещества [5]. Рассмотрены следующие случаи: *A* – только ферромагнитное (положительное) взаимодействие между ближайшими соседями; *B* – только антиферромагнитное (отрицательное) взаимодействие между ближайшими соседями;

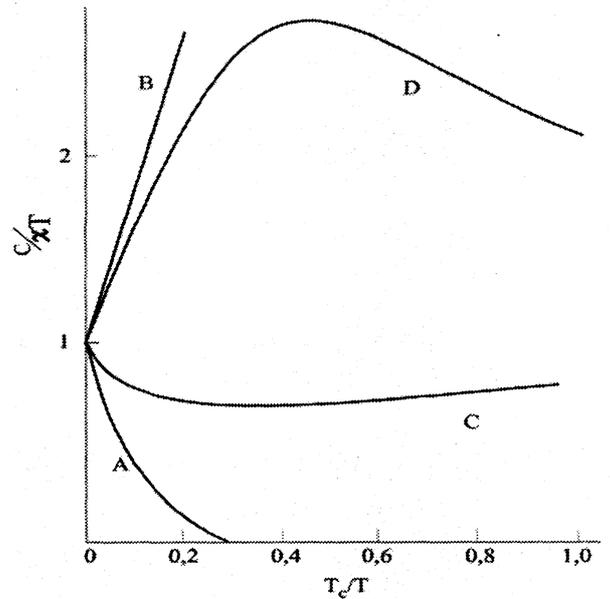


Рис. 2. Зависимости  $C/\chi T$  от приведенной температуры, полученные в [5]

*C* – сосуществование ферромагнитного взаимодействия между ближайшими соседями и дальнего антиферромагнитного; *D* – сосуществование антиферромагнитного взаимодействия между ближайшими соседями и дальнего ферромагнитного. Теоретические выводы, приведенные в работе [5], были подтверждены экспериментально для ряда аустенитных сталей [2].

С целью проверки обычного закона Кюри–Вейса были экспериментально найдены температурные зависимости обратной удельной магнитной восприимчивости  $1/\chi$  для сплавов H15, H23, H25, H26.6, H27.3, H29 (рис. 3).

Стрелками показано возникновение мартенсита в точке  $T_s$ . При приближении к мартенситной точке наклон кривых в сплавах H15, H23, H25 отличается от наклона кривых в сплавах H26.6, H27.3, H29. Как видно из рисунка, экспериментальные зависимости  $1/\chi(T)$  не подчиняются закону Кюри–Вейса:

$$\chi = \frac{C}{T - \theta}, \quad (2)$$

где  $C$  – константа Кюри;  $\theta$  – парамагнитная точка Кюри, определяемая экстраполяцией линейного участка зависимости  $1/\chi(T)$  на ось температуры.

На рис. 4 показаны экспериментальные зависимости  $\frac{1}{\chi T} \left( \frac{1}{T} \right)$  для исследуемых сплавов. Сравнивая с теоретическими кривыми, приведенными на рис. 1, видно, что наклон кривых  $\frac{1}{\chi T} \left( \frac{1}{T} \right)$

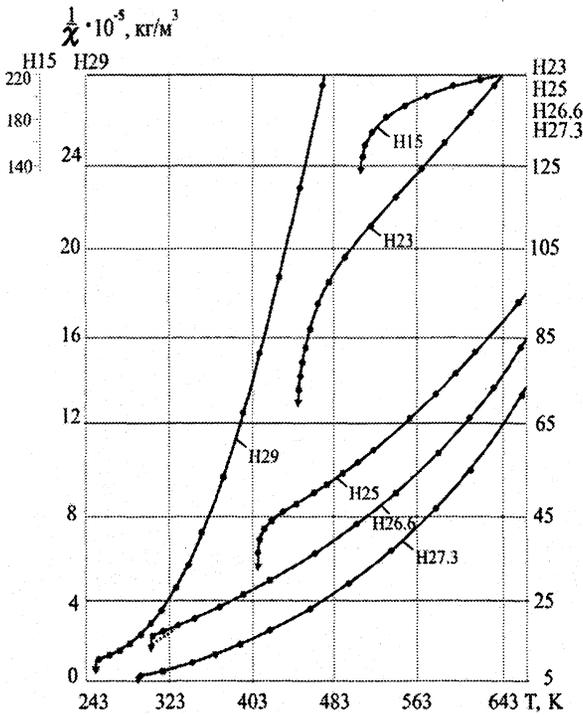


Рис. 3. Типичные температурные зависимости обратной удельной восприимчивости Fe – Ni-сплавов

вблизи  $T_s$  для сплавов H15, H23, H25 положительный, а для сплавов H26.6, H27.3, H29 – отрицательный.

Для сплава H15 при температурах, больших  $\sim 570$  К, наклон кривой  $\frac{1}{\chi T} \left( \frac{1}{T} \right)$  положительный,

т. е. при этих температурах преобладает отрицательное обменное взаимодействие между атомами, т. е. антиферромагнетизм. При температурах, меньших 570 К, наклон кривой становится отрицательным и магнитное состояние сплава H15 будет обусловлено в основном положительной обменной энергией, т. е. преобладает ферромагнитное состояние. Для сплавов H23, H25 с понижением температуры уменьшается антиферромагнитное взаимодействие между ближайшими атомами и увеличивается ферромагнитное вплоть до мартенситной точки. Для нашей вариации никеля сплав H26.6 как бы критический, т. е. вблизи  $T_s$  преобладает положительное обменное взаимодействие между атомами (ферромагнитное состояние аустенита). Для сплавов H27.3, H29 вблизи  $T_s$  заметно преобладает или существует только ферромагнитное состояние аустенита.

Можно предположить, что мартенсит с изотермической микрокинетикой (сплавы H15, H23, H25) в точке  $T_s$  зарождается с аустенита, в котором существует ферромагнитное взаимодействие между ближайшими атомами и далее – антиферромагнитное.

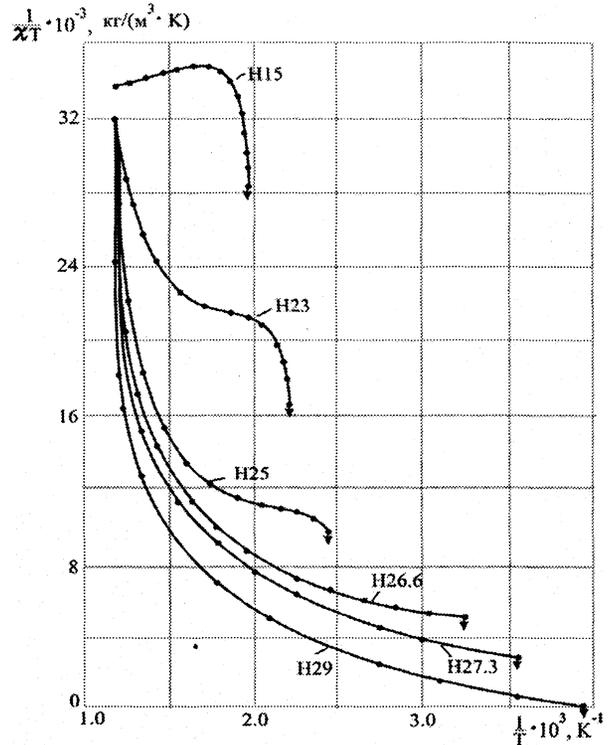


Рис. 4. Зависимость  $\frac{1}{\chi T} \left( \frac{1}{T} \right)$  для Fe – Ni-сплавов

В сплавах с атермической кинетикой (H26.6, H27.3, H29) мартенсит зарождается в  $T_s$  с аустенита, в котором существует только или преобладает ферромагнитное взаимодействие между атомами.

Очевидно, что для нашей системы образцов содержание никеля 26–27 мас.% гранично. С увеличением содержания Ni до граничного 26–27% постепенно уменьшается антиферромагнитное состояние и усиливается ферромагнитное состояние аустенита вблизи точки  $T_s$ . Это коррелируется с затуханием изотермической микрокинеки. С увеличением содержания Ni от 26–27% начинает преобладать ферромагнитное состояние по сравнению с антиферромагнитным и в сплаве H29 аустенит становится полностью ферромагнитным, что коррелируется с атермической микрокинетикой.

Естественно предположить [1, 2], что в исследуемых Fe–Ni-сплавах при подходе к мартенситной точке положительное обменное взаимодействие может привести к образованию маленьких однодоменных ферромагнитно-упорядоченных областей (кластеров), которые имеют магнитный момент, не равный нулю.

Вероятно, кластеры будут иметь разные размеры и поэтому разные магнитные моменты. Величина магнитного момента кластера будет увеличиваться с понижением температуры, поскольку условия для обменного взаимодействия атомов в средней точке и на ее периферии разные. При высоких

температурах основной вклад в результирующий магнитный момент кластера вносят только внутренне-ферромагнитные упорядоченные атомы. С понижением температуры все большая часть периферийных атомов будет участвовать в создании результирующего магнитного момента. Отсюда можно предположить, что в Fe–Ni-сплавах при подходе к точке  $T_S$  в аустените возникают маленькие области ферромагнитного порядка (кластеры). Эти кластеры есть наиболее вероятные места зарождения кристаллов мартенсита.

### Выводы

1. При подходе к мартенситной точке в Fe–Ni-сплавах с увеличением содержания никеля осла-

бляется антиферромагнитное и усиливается ферромагнитное состояние аустенита.

2. С увеличением содержания Ni до ~26–27% постепенно затухает изотермическая реакция, при содержании Ni больше ~26–27% усиливается атермическое превращение, что коррелируется с магнитным состоянием аустенита.

3. С понижением температуры до мартенситной точки в Fe–Ni-сплавах ферромагнитное взаимодействие между атомами приводит к образованию маленьких однодоменных областей (кластеров), которые являются наиболее вероятными местами зарождения кристаллов мартенсита.

### Литература

1. Ромашев Л. Н., Ворончихин Л. Д., Факиров И. Г. Изменение магнитных свойств стали вблизи мартенситной точки // ФММ. 1973. Т. 36. С. 291–294.
2. Ромашев Л. Н., Факиров И. Г. Роль магнитного состояния  $\gamma$ -фазы сплавов Fe–Cr–Ni в структурном  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращении под влиянием магнитного поля // ФТТ. 1974. Т. 16. С. 2793–2797.
3. Мирошниченко Ф. Д., Снежной В. Л. Магнитометрические весы с униполярно-астиатической системой и механико-магнитным зацеплением призмы // Приборостроение. Киев: Техника. 1966. № 2. С. 48–52.
4. Снежной В. Л., Мирошниченко Ф. Д., Каниболоцкий В. Г., Охромий Г. А. Влияние магнитного момента парамагнитной матрицы на определение низких содержаний  $\alpha$ -фазы в аустенитных сталях // ФММ. 1970. Т. 30. С. 363–370.
5. D a n i e l l a n A. On interpreting high temperature magnetic susceptibility data // Proc. Phys. Soc. 1962. Vol. 8. P. 981–985.