

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

И. А. БИЛЬДЗЮКЕВИЧ, Я. М. ГОЛОВЧИНЕР и академик Г. В. КУРДЮМОВ

**О ПРИРОДЕ ИЗМЕНЕНИЙ КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ
ПРИ ОТПУСКЕ ЗАКАЛЕННОЙ МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ**

Факторами, играющими существенную роль в сильном возрастании коэрцитивной силы при закалке стали, являются:

1) собственно мартенситный механизм превращения, приводящий к возникновению характерной микро- и субмикронеоднородности строения и напряжений;

2) свойства самих кристаллов мартенсита в связи с тем, что мартенсит является пересыщенным твердым раствором углерода в α -железе;

3) некоторая гетерогенность закаленной стали, почти всегда неизбежная вследствие наличия того или иного количества остаточного аустенита и частичного распада мартенсита, протекающего в большей или меньшей степени в процессе охлаждения при закалке.

В ⁽¹⁾ было установлено, что сам по себе мартенситный механизм превращения приводит к значительному возрастанию коэрцитивной силы вследствие возникающего внутреннего наклепа.

Для выяснения относительной роли других факторов целесообразно изучение коэрцитивной силы при отпуске закаленной стали, особенно в связи с тем, что наши знания о процессах, происходящих при отпуске, значительно углубились в результате ряда рентгеноструктурных исследований ^(2, 15).

В особенности целесообразным является изучение коэрцитивной силы в малоуглеродистой стали с содержанием углерода около 0,1%. В этом случае характер структурных изменений значительно упрощается. Остаточный аустенит в такой стали практически отсутствует. Кроме того, в такой стали не происходит выделения карбидной фазы при отпуске, если температура его не превышает 200—250°. Закалкой же удастся перевести весь углерод в α -твердый раствор ⁽³⁾.

В настоящей работе исследовалась малоуглеродистая сталь, содержащая 0,10—0,12% углерода. Содержание примесей находилось в обычных для этих сталей пределах. Для исследования использовались цилиндрические образцы (5×60), закаленные от температуры 1100° в воде.

Измерения производились на коэрцитиметре типа мессгенераторов. Значения коэрцитивной силы для каждого состояния получались как среднее из результатов измерения трех образцов, причем на каждом образце коэрцитивная сила измерялась не менее 3 раз. Ошибка отдельного измерения не превышала $\pm 0,5$ эрст.

Закаленные образцы подвергались отпуску последовательно при температурах 100; 150; 220; 270; 400; 450; 600°. После каждой ступени отпуска производилось измерение коэрцитивной силы.

Результаты опытов представлены на рис. 1. Из приведенной кривой видно, что коэрцитивная сила падает при отпуске до 220°, уменьшаясь с 19 до 12 эрст. При этом, как указывалось выше, в стали не только не имеет места выделение карбидной фазы, но вообще не происходит каких-либо структурных изменений, фиксируемых рентгенографически. Ширина рентгеновских интерференционных линий ⁽⁴⁾ и отношение их

интенсивностей ⁽⁵⁾ остаются такими же, как и после закалки. На отсутствие процессов распада в таких сталях при температурах отпусков ниже 200—250° указывает также и то, что при этом отсутствуют тепловые ⁽⁶⁾ и объемные ⁽⁷⁾ эффекты.

Отсюда можно заключить, что изменение коэрцитивной силы при низком отпуске закаленной малоуглеродистой стали должно обуславливаться процессами, происходящими внутри пересыщенного α -твердого раствора, т. е. внутри кристаллов мартенсита. Таким процессом может быть перераспределение концентрации растворенного углерода.

Как известно, характерным для состояния закаленной стали является то, что кристаллы мартенсита упруго деформированы ⁽¹⁵⁾. Именно наличие этой упругой деформации в микрорегионах (искажений II рода), достигающей в закаленной стали высоких значений, в основном определяет большую размытость линий мартенсита. Для стали уже с 0,1% углерода эта деформация достигает значений $\Delta a/a$ около $3 \cdot 10^{-3}$, тогда как для железа — около $1 \cdot 10^{-3}$.

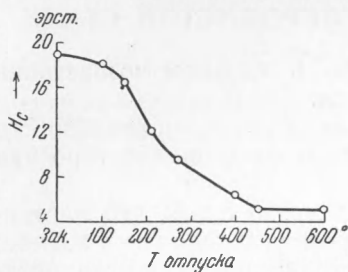


Рис. 1. Зависимость коэрцитивной силы от температуры отпуска в закаленной стали с содержанием углерода 0,1%. Температура закалки 1100°

В работах ^(8, 9) показано, что в электролитически выделенном мартенсите напряжения II рода практически полностью снимаются. Тем самым было получено прямое доказательство того, что кристаллы мартенсита закаленной стали упруго деформированы. С другой стороны, сдвиговый характер превращения и пластинчатая форма мартен-

ситных кристаллов позволяют заключить, что отдельные кристаллы мартенсита, будучи зажаты в общей массе металла, являются упруго деформированными неоднородно, в частности изогнутыми.

Наличие неоднородно напряженного состояния, как это следует из работ ⁽¹⁰⁻¹³⁾, должно вызвать диффузию углерода из сжатых в растянутые области. Такое перераспределение концентрации углерода должно приводить к частичной релаксации напряжений. При этом вследствие того, что подвижность атомов железа остается еще очень малой, деформация кристаллов мартенсита остается неизменной.

Таким образом, в результате перераспределения углерода упругая деформация переходит частично в неупругую, определяемую концентрационной неоднородностью по углероду. Поскольку рентгенографически фиксируются именно искажения (деформации), а не напряжения, то ширина интерференционной линии в этом случае остается неизменной. Уменьшение же напряжений должно вызывать падение коэрцитивной силы ⁽¹⁴⁾.

На рис. 1 видно, что отпуск при 220° вызывает уменьшение вдвое того прироста коэрцитивной силы, который возникает в результате закалки. Твердость же закаленной стали с 0,1% углерода при таком отпуске практически не изменяется ⁽⁴⁾. Последнее обуславливается тем, что сопротивление деформированию определяется характером микро- и субмикроструктуры и свойствами самих кристаллов мартенсита ⁽¹⁵⁾. Перераспределение углерода внутри кристаллов мартенсита практически не меняет характера микро- и субмикронеоднородности структуры, поскольку относительные положения атомов железа остаются неизменными. Происходит лишь некоторое изменение распределения смещений атомов железа (статических искажений решетки твердого раствора), которое, повидимому, мало отражается на пластических свойствах самих кристаллов мартенсита. Перераспределение приводит главным образом к тому, что уменьшаются напряжения (упругая деформация в микрообъемах заменяется неупругой).

Таким образом, уменьшение коэрцитивной силы в результате отпуска при 220° происходит в нашем случае только за счет падения напряжений.

Рассмотренный в настоящей работе случай изменения коэрцитивной силы при отпуске представляет большой интерес для понимания природы коэрцитивной силы потому, что здесь почти в чистом виде можно наблюдать влияние напряжений в микрообъемах на коэрцитивную силу. Значительное уменьшение коэрцитивной силы за счет разрядки внутренних напряжений без изменения структуры и расположения атомов железа позволяет заключить, что большая коэрцитивная сила закаленной стали в значительной мере обуславливается напряжениями II рода, возникающими как следствие мартенситного механизма превращения и высокого предела упругости кристаллов мартенсита (¹⁵).

Институт металловедения
и физики металлов
ЦНИИЧМ

Поступило
9 VI 1954

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ И. А. Бильдзюкевич, Я. М. Головчинер, Проблемы металловедения и физики металлов, 3-й сборн. тр., 1952, стр. 281. ² Г. В. Курдюмов, Сборн. научн. работ лаб. металлофизики АН УССР, № 2, 3 (1950). ³ Г. В. Курдюмов, М. Д. Перкас, А. Е. Шапов, ДАН, 92, № 5, 955 (1953). ⁴ Г. В. Курдюмов, Н. Ослон, ЖТФ, 9, № 21, 1891 (1939). ⁵ Н. М. Нодиа, Диссертация, М., 1953. ⁶ П. Л. Грузин, Г. В. Курдюмов, Р. И. Энтин, Металлург, № 8, 15 (1940). ⁷ Э. З. Каминский, Д. Кацнельсон, ЖТФ, 15, № 3, 182 (1945). ⁸ М. П. Арбузов, ДАН, 74, № 6, 1085 (1950). ⁹ М. П. Арбузов, Л. И. Лысак, Е. Г. Нестеренко, ДАН, 90, № 3, 375 (1953). ¹⁰ В. С. Горский, Phys. Zs. d. Sowjetunion, 8, 443 (1935). ¹¹ С. Т. Конобеевский, Я. П. Селицкий, Тр. Гинцвет-мета, 1933. ¹² С. Т. Конобеевский, Сборн. научн. докл. секции металловед. и термич. обработки ВНИТО металлургов, 1940, стр. 19. ¹³ С. Т. Конобеевский, ЖЭТФ, 13, № 6, 200 (1943). ¹⁴ Е. И. Кондорский, ЖЭТФ, 7, № 9—10, 1117 (1937). ¹⁵ Г. В. Курдюмов, ЖТФ, 24, № 7, 1254 (1954).