

С. З. БОКШТЕЙН

**КОАГУЛЯЦИЯ И РАЗЛОЖЕНИЕ КАРБИДОВ (ГРАФИТИЗАЦИЯ)
ПРИ ОТПУСКЕ КРЕМНИСТОЙ СТАЛИ**

(Представлено академиком Н. Т. Гудцовым 15 V 1950)

Введение легирующих элементов оказывает существенное влияние на процессы фазовых превращений при отпуске закаленной стали, что приводит к изменению строения и, следовательно, свойств отпущеной стали. Настоящая статья посвящена закономерностям коагуляции карбидов и процессу графитизации при отпуске закаленной кремнистой стали.

Исследование подвергались среднеуглеродистая сталь (0,4% С) с переменным содержанием кремния (0,25; 1,75 и 2,75%). Количественное исследование микроструктуры производилось статистическим методом, описанным ранее (1). Закалка стали проводилась с температуры 930° (первые две стали) и 980°, а последующий отпуск продолжительностью от 10 мин. до 25 час. при 700°.

А. Процесс коагуляции и карбидов. Полученные при статистическом исследовании данные по распределению карбидных частиц по размерам на разных стадиях изотермического отпуска (700°) и изучение кинетики процесса показывают, что коагуляция карбидов кремнистой стали качественно не отличается от описанной ранее для углеродистой и никелевой стали (4, 5).

Б. Влияние кремния на дисперсность карбидов. Введение в сталь кремния задерживает развитие процесса коагуляции и приводит к уменьшению размеров карбидных частиц. В соответствии с этим возрастает число мелких и уменьшается число крупных частиц в стали, легированной кремнием, по сравнению с нелегированной. Действие кремния в смысле увеличения дисперсности карбидов, однако, относительно невелико (см. табл. 1).

В условиях продолжительного отпуска кремнистой стали наблюдается отклонение от общепринятого хода процесса коагуляции, что объясняется наложением параллельно протекающего другого процесса — графитизации.

В. Графитизация при отпуске кремнистой стали. В процессе изотермического отпуска (550—700°) кремнистой стали наряду с процессом коагуляции карбидов происходит разложение их.

Развитие идей А. А. Байкова (1) и Н. Т. Гудцова (2) в работах советских металлургов позволило в значительной степени выяснить

Таблица 1

Влияние кремния на средний размер карбидных частиц ($d_{ср} \cdot 10^4$ мм, отпуск 700°)

| % Si | 10 мин. | 30 мин. | 1 час |
|------|---------|---------|-------|
| 0,29 | 3,57 | 4,32 | 4,49 |
| 1,75 | 3,44 | 3,99 | 4,25 |
| 2,75 | 3,16 | 3,50 | 3,87 |

сущность процесса графитизации ⁽³⁾. Однако особенностям процесса при отпуске среднеуглеродистой стали ($\sim 0,4\%$ С) уделялось относительно мало внимания.

В исследованной нами стали разложение цементита при отпуске устанавливалось различными методами.

1. Металлографически — по резкому уменьшению числа карбидов после продолжительного отпуска (см. табл. 2).

Таблица 2

Изменение числа карбидных частиц ($\times 10^{-4}$) в 1 мм^3 в углеродистой и кремнистой стали при изотермическом отпуске (700°)

| %Si | 10 мин. | 30 мин. | 1 час | 6 час. | 25 час. |
|------|---------|---------|-------|--------|---------|
| 0,3 | 63,7 | 59,3 | 51,9 | 44,5 | 29,7 |
| 1,71 | 66,6 | 59,4 | 50,4 | 26,7 | 13,4 |
| 2,8 | 68,0 | 60,0 | 49,0 | 10,0 | 8,0 |

2. При помощи карбидного анализа ⁽⁶⁾ — по уменьшению в карбидном осадке в процессе изотермического отпуска (650°) количества железа (см. табл. 3).

Таблица 3

Изменение количества связанного углерода в процессе изотермического отпуска (650°)

| | Состав стали | | | |
|---------|---------------------|----------------------|--------------------|------|
| | 0,40% С, 0,3% Si | 0,41% С, 1,75% Si | 0,40% С, 2,75% Si, | |
| | | | 650° | 550° |
| 30 сек. | 0,40 | 0,40 | 0,40 | — |
| 5 мин. | 0,40 | 0,39 | 0,39 | — |
| 30 мин. | 0,40 | 0,41 | 0,40 | — |
| 1 час. | 0,40 | 0,40 | 0,34 | 0,40 |
| 5 час. | 0,40 | 0,33 | 0,05 | 0,39 |
| 25 час. | 0,40 | 0,07 | 0,05 | 0,17 |

3. Рентгенографически. После длительного отпуска при высокой температуре (650° , 25 часов) дебаеграмма высококремнистой стали (2,75%) характеризуется исчезновением линий ромбического карбода Fe_3C и появлением весьма интенсивной линии в начальной части рентгенограммы. Положение этой линии соответствует отражению (002) решетки графита. Слабая кристаллизационная способность структуры графита объясняет отсутствие других отражений, кроме плоскости базиса, наиболее густо усеянной атомами, и образование этой структуры после длительного отпуска.

Обсуждение

1. Из рассмотрения экспериментальных данных следует, что при изотермическом отпуске (550 — 700°) среднеуглеродистой кремнистой стали одновременно с процессом коагуляции происходит процесс разложения карбидов. Этим последним определяется своеобразие первого процесса.

Детальное изучение кинетики процесса коагуляции показывает, что разложение карбидов начинается с распада наиболее дисперсных частиц, т. е. наименее устойчивых. Это приводит для отдельных моментов отпуска, соответствующих началу заметного течения процесса графитизации, к необычайному увеличению среднего диаметра карбидных частиц. С дальнейшим течением отпуска в процесс разложения вовлекаются частицы больших размеров, в соответствии с чем на этой стадии отпуска имеет место уменьшение числа крупных частиц вместо нормального увеличения их и ненормальный рост числа средних по размеру карбидов.

Процессы коагуляции и графитизации на первых этапах своего развития протекают аналогично. Оба процесса начинаются с диссоциации карбидной частицы и, следовательно, чем дисперсней частицы, тем интенсивнее протекает начало обоих процессов.

Однако начальная стадия отпуска характеризуется преимущественно интенсивным протеканием процесса коагуляции карбидов, а разложение карбидов с заметной скоростью характеризует развитую стадию отпуска и получает преимущественное развитие вслед за интенсивной коагуляцией.

Образование структуры графита, в связи с плохой кристаллизационной способностью графита и необходимостью образования в твердом растворе объемов со значительной флуктуацией концентрации углерода, происходит после длительного отпуска.

2. Проведенные нами опыты показывают далее, что разложение карбидов при отпуске стали находится в зависимости от характера исходной структуры (см. табл. 4).

Таблица 4

Количество связанныго углерода после различной обработки кремнистой стали (0,35% С, 2,55% Si)

| № п.п. | Термическая обработка | % С |
|-----------|---|------|
| 1 | Закалка 980°, отпуск 650°, 6 час... | 0,15 |
| 2 | Изотермическая обработка (980—650°, 6 час.) | 0,35 |
| 3 | Изотермическая обработка (980—650°, 6 час.) и последующий отпуск (650°, 6 час.) | 0,35 |
| 4 | Изотермическая обработка (980—300°, 2 часа) и последующий отпуск (650°, 6 час.) | 0,16 |

Сопоставление данных карбидного анализа после изотермического отпуска и изотермического распада переохлажденного аустенита (650°) кремнистой стали (обработки 1 и 2) показывает разложение карбида в первом случае и отсутствие графитизации во втором. Сопоставление обработки 3 и 4 показывает далее, что в равных условиях отпуска (650°, 6 часов) в случае предварительного распада аустенита в перлитной зоне (650°), приводящего к образованию грубо пластинчатой структуры, разложения карбидов не происходит, а при распаде в промежуточной зоне (300°), приводящем к образованию тонко дисперсной структуры, имеет место при последующем отпуске значительный распад карбида железа.

Из приведенных данных следует, таким образом, что разложение карбидов при отпуске стали происходит при наличии параллельно про-

текающего процесса коагуляции. Последний заключается в диффузионном перемещении углерода в феррите. Сам факт непрерывного перемещения углерода в феррите в связи с растворением малых и ростом больших карбидных частиц приводит к появлению возможности образования объемов с высоким содержанием углерода, т. е. к графитизации стали, чему благоприятствует высокое содержание кремния, препятствующего, вероятно, формированию зародыша карбидной фазы.

В случае пластинчатой структуры диффузионное перемещение углерода в феррите после окончания распада аустенита, при выбранных условиях опыта, практически отсутствует. Поэтому графит может образовываться только в результате непосредственного разложения карбидов в объеме пластинки. Однако непосредственное разложение карбида без диффузии, как известно, из опытных данных, происходит с заметной скоростью в стали при более высоких температурах (порядка 900—1000°). Поэтому при температуре ниже критической ($\sim 650^{\circ}$) процесса графитизации пластинчатой структуры при отсутствии коагуляции практически не наблюдается.

Поступило
11 V 1950

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ А. Байков, ЖРМО, № 6, 846 (1914). ² Н. Гудцов, Ф. Баранов и О. Кузьмин, Металлург, №№ 5 и 6 (1936). ³ Н. Гиршович, Чугунное литье, 1949. ⁴ С. Бокштейн, ЖТФ, 17, в. 12 (1947). ⁵ С. Бокштейн, ЖТФ, 20, в. 3 (1950). ⁶ Н. Попова. Зав. лаб., № 10 (1945).