

## СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ЛИТОЙ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ ПРИ ЗАКАЛКЕ

Климашин С.И., Тихонькова О.В., Целлермаер В.В., Попова Н.А.\*,  
Козлов Э.В.\*, Коновалов С.В., Громов В.Е.

Сибирский государственный индустриальный университет,  
654007, г.Новокузнецк, ул.Кирова, д.42, тел. (3843) 462277, e-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

\*Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
634003, г.Томск, Соляная пл. 2, тел. (3822) 654265, e-mail: kozlov@tsuab.ru

Закалка конструкционных сталей сопровождается формированием нескольких типов мартенсита: пакетного, пластинчатого низкотемпературного и пластинчатого высокотемпературного, различающихся морфологией, размерами и дефектной субструктурой кристаллов  $\alpha$ -фазы. Размеры и внутренняя структура мартенситных кристаллов зависит от целого ряда факторов: размер зерна исходного аустенита, скорость охлаждения, температура аустенизации, химический состав стали. В связи с этим изучение данных факторов является важной в научном и технологическом планах задачей.

Целью данной работы являлось количественное исследование тонкой структуры и фазового состава литой конструкционной среднелегированной стали 30ХНЗМФА после закалки. Образцы, имеющие форму слитков размером 80×80×260 мм, подвергались предварительной термической обработке: гомогенизация 1125<sup>0</sup>С, 13 часов, нормализация 980<sup>0</sup>С, 10 часов и высокий отпуск 660<sup>0</sup>С, 10 часов с охлаждением на воздухе. Затем проводилась закалка от 950<sup>0</sup>С (выдержка 5 часов) с охлаждением на воздухе.

Как показали проведенные исследования, кристаллическая структура матрицы стали состоит из двух фаз: твердого раствора углерода и легирующих элементов в  $\alpha$ -Fe с ОЦК решеткой и твердого раствора углерода и легирующих элементов и  $\gamma$ -Fe с ГЦК решеткой.

Основной составляющей (~93%) в структуре матрицы закаленной стали является  $\alpha$ -фаза, которая характеризуется следующими значениями: параметр кристаллической решетки - 0,28702 нм, статические смещения атомов - 0,02 нм, уровень микронапряжений II рода - 700 МПа. Структура  $\alpha$ -фазы представляет собой смесь пакетного (или реечного), пластинчатого (низкотемпературного и высокотемпературного) мартенсита и бейнита.

Пакетный (или реечный) мартенсит – это набор приблизительно параллельных мартенситных кристаллов (реек), объединенных в пакеты. Он занимает основную долю  $\alpha$ -матрицы (~80%). Пластинчатый мартенсит – это второй самостоятельный морфологический тип  $\alpha$ -матрицы исследуемой стали. Особенностью этого типа мартенсита является то, что он представляет собой отдельно расположенные кристаллы мартенсита – пластины, как правило, не образующие параллельных пачек, что наблюдается в пакетном мартенсите. Поперечный размер пластин больше поперечного размера отдельной реки примерно на порядок и составляет величину ~1-2 мкм. Отдельные мартенситные пластины встречаются двух видов: 1) большие пластины, длина которых достигает 20-25 мкм и 2) малые пластины длиной 1.5-2 мкм. Большие пластины лежат друг к другу под некоторыми углами и пронизывают практически все зерно. Их размер ограничивается либо границами зерна, либо другой большой пластиной, образовавшейся в этом же зерне. Размер же малых пластин ограничен большими пластинами и пакетами реек. Кроме того, в исследуемой стали присутствует еще один вид пластинчатого мартенсита – это области, бесструктурные по форме, не содержащие внутри себя ни реек, ни пластин, ни других четко обозначенных границ раздела. Располагаются такие области либо на стыках пакетов, либо на стыках пакетов и пластин. По-видимому, большие пластины и пластины в виде бесструктурных областей образовались при более высоких температурах мартенситного превращения и

поэтому относятся к высокотемпературному мартенситу. Малые пластины, образовавшиеся при более низких температурах, - к низкотемпературному мартенситу. Проведенные количественные оценки показали, что объемная доля высокотемпературного мартенсита в  $\alpha$ -матрице стали составляет величину  $\sim 3\%$ , а низкотемпературного -  $\sim 7\%$ .

В результате охлаждения образцов после проведенной закалки происходит частичный «самоотпуск» материала с выделением внутри мартенситных кристаллов дисперсной фазы - частиц карбида железа. Нужно отметить, что если весь пластинчатый мартенсит (как высоко-, так и низкотемпературный) находится в состоянии частичного «самоотпуска», то в пакетном мартенсите процессы «самоотпуска» развиваются неодинаково: наряду с «самоотпущенным» пакетным мартенситом, объемная доля которого составляет  $\sim 60\%$  от общего объема  $\alpha$ -матрицы, в материале присутствуют рейки и даже целые пакеты, в которых процессы «самоотпуска» практически полностью отсутствуют. Такой пакетный мартенсит является дислокационным (или безкарбидным) мартенситом и образовался он в результате мартенситного превращения. Объемная доля дислокационного мартенсита в материале -  $\sim 20\%$  от общего объема  $\alpha$ -матрицы. Третий самостоятельный морфологический тип  $\alpha$ -матрицы исследуемой стали – бейнит.

Установлено, что остаточный аустенит в пакетном и пластинчатом низкотемпературном мартенсите располагается по границам мартенситных кристаллов в виде длинных тонких прослоек. В пластинчатом высокотемпературном мартенсите он располагается внутри мартенситных кристаллов и имеет вид «островков» или «игл». В бейните остаточного аустенита не обнаружено. Объемная доля остаточного аустенита -  $\sim 7\%$ . Отметим, что его большая часть ( $\sim 6\%$ ) находится в пакетной составляющей мартенсита, а наименьшая часть ( $\sim 0.5\%$ ) – в пластинчатом высокотемпературном мартенсите.

Размеры частиц, плотность распределения и объемная доля в различных морфологических составляющих мартенсита «самоотпуска» различны. Самые мелкие частицы цементита ( $10 \times 15$  нм) образуются в пакетном мартенсите, самые крупные ( $30 \times 120$  нм) – в пластинчатом высокотемпературном мартенсите. Отметим, что при этом плотность частиц цементита в пакетном мартенсите самая высокая ( $1.4 \cdot 10^6 \text{ см}^{-1}$ ), а в пластинчатом высокотемпературном мартенсите – самая низкая ( $0.03 \cdot 10^6 \text{ см}^{-1}$ ).

Метод просвечивающей электронной микроскопии при больших ( $50000 - 70000$  крат) увеличениях показал, что каждый кристалл  $\alpha$ -матрицы характеризуется наличием плотной дислокационной структурой. Дислокации равномерно заполняют кристаллы, образуя из резко искривленных и перепутанных линий подобие трехмерной сетки. Контраст на дислокациях размыт вследствие осажденных на них атомов углерода и образовавшихся при этом атмосфер Коттрелла и Максвелла.

Средняя скалярная плотность дислокаций в целом по материалу составляет величину  $6 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$ . При этом самое высокое значение ( $6.3 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$ ) она имеет в пакетном дислокационном мартенсите, а самое низкое ( $4.5 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$ ) – в пластинчатом высокотемпературном мартенсите.

Закалка стали сопровождается формированием дальнедействующих полей напряжений, проявляющихся при электронно-микроскопических исследованиях тонких фольг в виде экстинкционных изгибных контуров. Отметим, что такие контуры не являются результатом деформации образца при изготовлении из него тонкой фольги, т.к. применяемая методика приготовления фольг практически исключает внесение артефактов при ее приготовлении. Наличие экстинкционных контуров – есть результат изгиба кристаллической решетки, или изгиба кристалла  $\alpha$ -матрицы. При этом лишь небольшая часть кристалла находится в точном отражающем положении.