
УДК 669.15–194.51:669.112.227.322:548

ОСОБЕННОСТИ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ РЕШЁТКАМИ ПЕРВИЧНОГО И ЭВТЕКТОИДНОГО ФЕРРИТОВ

Г. Д. Сухомлин, д.т.н., проф.

*ГВУЗ «Приднепровская государственная академия
строительства и архитектуры»*

Введение

В углеродистых сталях эвтектоид (перлит) является одной из основных структурных составляющих и от её удельного содержания зависят прочностные и пластические свойства изделий. Кроме того, существенный вклад в поведение перлитных сталей при деформации вносят детали тонкой структуры – межпластиночные расстояния, длина свободного пробега дислокаций, морфология карбидной составляющей и многие другие [1, 2].

При диффузионном перлитном превращении сравнительно крупнозернистого аустенита зародыши перлита возникают на самых «энергетических» составляющих зернограничной сети аустенита – в первую очередь в узлах и на тройных стыках. В процессе роста они превращаются в сфероподобные образования («нодулы» в англоязычной литературе), состоящие из большого (10...50 единиц) количества «элементарных» колоний. В стали эвтектоидного состава нодулы разрастаются, сливаются в сплошной перлитный массив и заполняют исходное аустенитное зерно. В доэвтектоидных сталях процесс распада аустенита начинается с выделения избыточного феррита, который также зарождается в узлах и тройных стыках зёрен аустенита, но конечная зёрнистая структура и кристаллогеометрические зависимости продуктов распада аустенита совсем иные. В связи с этим возникают вопросы, ответы на которые могут внести существенные поправки в прочностные и пластические свойства феррито-перлитных сталей:

- существуют ли большеугловые границы между избыточным и перлитным ферритами;
- существуют ли границы между ферритными решётками соседних колоний в перлитном нодуле.

Эти вопросы уже затрагивались в отдельных работах [3-5], однако убедительные ответы пока не были получены. Очевидно, что в случае отрицательных ответов на поставленные выше вопросы, структура феррита будет более мелкозернистая, чем в случае положительного ответа, со всеми вытекающими для практики последствиями.

В соответствии с изложенным, исследования взаимоотношений между ферритными и цементитными составляющими в феррито-перлитных сталях имеют научное и практическое значение, поэтому их изучение остается актуальным.

Цель исследования – определить характер кристаллографических связей между избыточным и эвтектоидным ферритом, а также между ферритными составляющими соседних колоний.

Материал и методика исследования

Материалом для исследований служила горячекатаная доэвтектоидная сталь 36Г2С, содержащая 0,34% С. После горячей прокатки в ее структуре присутствуют феррит и перлит в соотношении 42/56.

Основным методом исследования являлась дифракционная электронная микроскопия тонких фольг в сочетании с микродифракцией от выбранных участков малых размеров ($0,5 \dots 2,0 \text{ мкм}^2$), позволяющая получить сведения о наличии или отсутствии границы между отдельными осознанно выбранными двумя или несколькими зёрнами и определить взаимную ориентацию их кристаллических решёток с высокой точностью (до $0,2^\circ$) [6]. В работе применяли селекторную диафрагму диаметром 1,2 мкм в масштабе образца. Исследования выполнены на электронном микроскопе ЭМ-125К, оснащённом гониометрическим устройством. Микродифракционный материал обрабатывали с помощью двойных стереопроекций [7] и сетки Вульфа диаметром 200 мм.

Результаты исследований и их интерпретация

Было изучено 168 случаев границ раздела между ферритными решётками перлитных колоний, с одной стороны, и структурно свободным (доэвтектоидным) ферритом с другой.

Установлено, что кристаллы эвтектоидного и доэвтектоидного феррита, как правило, разделены большеугловыми границами (151 случай); в 4-х случаях границами раздела были субзёрненные границы с углами разориентации $2 \dots 6^\circ$; в 13 случаях границы отсутствовали. Типичный пример показан на рисунке 1а, где между колонией перлита и доэвтектоидным ферритом контраст, характерный для границ, не наблюдается. Соответствующие микродифракционные картины (МДК) от выбранных участков перлита (рис. 1б) и феррита (рис. 1в) показаны окружностями по размеру селекторной диафрагмы. Они подтверждают, что решетки феррита внутри колонии и вне ее имеют одинаковую ориентацию осей зон [13 1]а, как в вертикальном, так и в азимутальном направлениях. Если учитывать тонкие детали дифракционных картин, то можно отметить, что линия Кикучи в окрестностях рефлекса (112) несколько смещена относительно рефлексов МДК на величину около $0,2^\circ$. Такая малая величина отклонения от коллинеарности осей зон двух ферритных решёток объясняется небольшим изгибом фольги из-за релаксации упругих напряжений при изготовлении тонкой фольги.

Аналогичное явление наблюдали Хульгтgren и Олин [3] при исследовании доэвтектоидной стали в поляризованном свете. Они полагают, что этот факт связан с возможностью зарождения и роста перлитной колонии, в частности, её ферритной составляющей, из кристалла доэвтектоидного феррита. С другой стороны, по нашему мнению, растущая колония может участвовать в образовании свободного от карбидов феррита, путём сохранения ориентации эвтектоидного феррита, если пластины цементита перлитной колонии прекращают формироваться в кооперации с ферритной фазой, которая в таких случаях продолжает свой рост как структурно свободный

феррит. Именно этот вариант интерпретации структуры, приведенной на рисунке 1, наиболее вероятен.

Имеется возможность различать эти варианты и определить истинный ход событий. Дело в том, что зарождение и рост колонии на границе с ферритом, рост которого обычно сопровождается перед ним скачком концентрации и некоторого пересыщения по углероду, которое требуется для образования цементита, в результате чего на краях первоначальных пластин зарождающегося цементита образуются "пятки", утолщения, повсеместно встречающиеся в перлитных колониях доэвтектоидных сталей. В нашем случае они видны в левом верхнем углу на рисунке 1а.

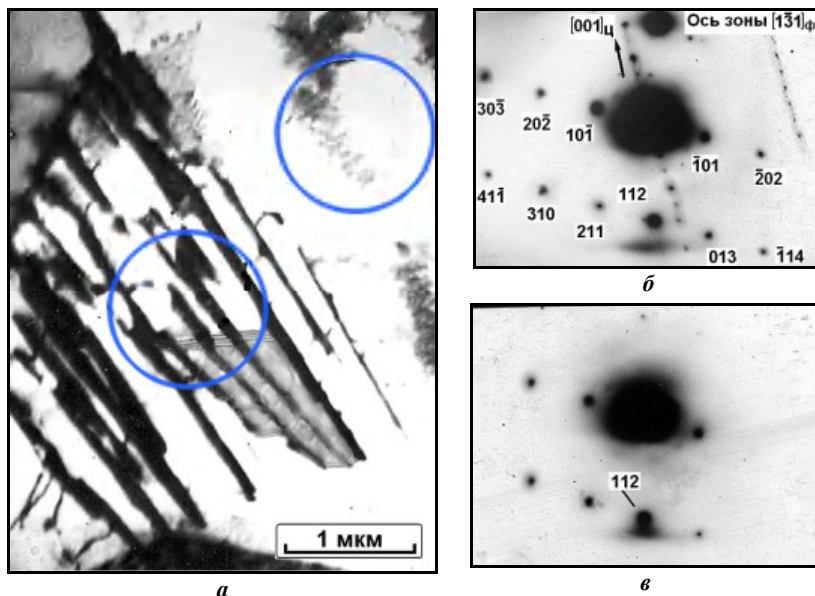


Рис. 1. Единообразная ориентация эвтектоидного и доэвтектоидного феррита в перлите стали 36Г2С: *а* – светлопольное изображение; *б* – микродифракционная картина от колонии перлита; *в* – то же от свободного от карбидов феррита.

Когда колония растёт в условиях некоторого дефицита по углероду и перед фронтом превращения встречаются флуктуационные зоны с низким содержанием углерода, пластины цементита становятся тоньше, и в предельном случае они могут приостановить рост в одностороннем порядке. В этом случае утолщения на краях цементитных пластин отсутствуют, что можно использовать для определения причин образования общей ферритной решётки доэвтектоидного и перлитного феррита.

Взаимная ориентация ферритных решёток соседних колоний цементита

Ферритные решётки соседних колоний разделены большеугловыми границами, но бывают случаи, когда ферритные границы между колониями имеют весьма небольшую разориентацию или отсутствуют совсем.

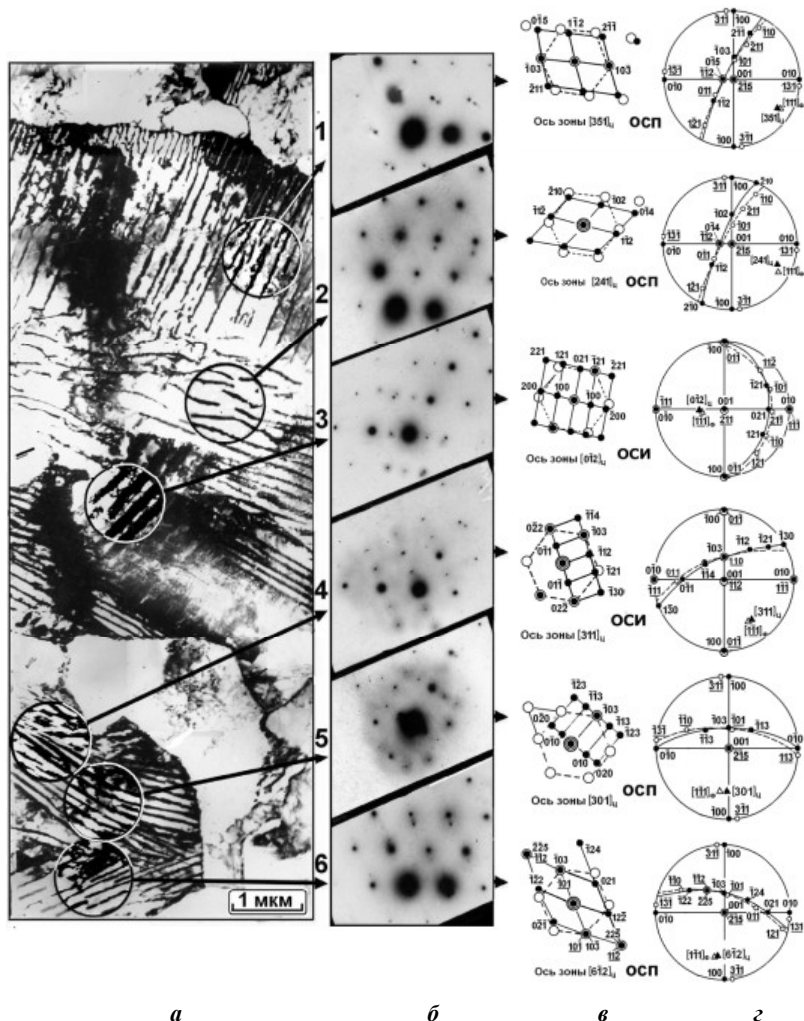


Рис. 2. Группа колоний перлита в горячекатаной стали 36Г2С, в которых ориентация феррита $[111]_a$ является общей для шести групп цементитных пластин (колоний). *а* – изображение; *б* – микродифракционные картины; *в* – схемы их индирования; *г* – стереопроекции.

На рисунке 2а представлен редкий случай образования семейства из шести колоний с различной ориентацией цементитных решёток, но с единообразной ориентацией ферритной решётки $[111]_a$.

Анализ МДК показывает, что цементитные решётки каждой из шести колоний (рис. 2а) сопряжены с ферритной «матрицей» строгими закономерностями, известными как ориентационные соотношения Исайчева [8] и Питча [9], присущие перлитным структурам большинства углеродистых сталей и чугунов [2]. Об этом свидетельствуют МДК (рис. 2б) и их графическая (рис. 2в) и стереографическая (рис. 2з) интерпретации.

Отметим, что при индцировании МДК и построении стереопроекции были использованы полученные ранее [6, 7] лабораторные варианты ОС Исайчева и Питча, поэтому одни и те же векторы решёток феррита в схемах МДК для разных колоний могут иметь разные варианты обозначения внутри одного семейства плоскостей или векторов.

Представляет интерес особенности взаимодействия между колониями 5 и 6. На микродифракционных картинах видно, что ориентация ферритной решётки в них отвечает оси зоны $[111]_f$, как и в других колониях, однако цементитные пластины ориентированы осями зон $[301]_c$ и $[61]_2c$, которые отстоят друг от друга на угол $\sim 13^\circ$. Это соответствует малоугловой субзёрненной границе, то есть, цементитные решётки двух колоний сопоставимы с двумя фрагментами одного и того же кристалла, разделенными малоугловой субграницей. С другой стороны, на изображениях колоний видно, что габитусные плоскости цементитных пластин в этих колониях резко отличаются, а решётки сопряжены с ферритной «матрицей» разными вариантами ориентационного соотношения Питча. Таким образом, колонии 5 и 6 являются вполне самостоятельными образованиями с независимой ориентацией цементитных решёток. Межпластиночные расстояния в колониях – 170...250 нм: Поэтому при различных нагрузках рассмотренные колонии будут оказывать такое же сопротивление деформации, как и остальные колонии блока.

В работах [3, 5] уже наблюдали единичные случаи расположения двух цементитных систем в одном феррите.

Одинаковая ориентация феррита в смежных колониях – редкое явление в перлите доэвтектоидных сталей. В работах, посвящённых рассмотрению этих вопросов [3, 4], подобные факты не отмечались. Напротив, Хулыгрен и Олин [17], изучая стали доэвтектоидного, эвтектоидного и заэвтектоидного составов, не наблюдали случаев, когда феррит являлся общим хотя бы для двух цементитных систем, то есть колоний. Исключение составляли редкие колонии, расположенные по разные стороны от плёнки заэвтектоидного цементита, обволакивающей аустенитные зёрна. Сошлифовки показали, что обе части обычно связаны между собой перешейком, проходящим сквозь щель в цементитном каркасе (оболочке) [6]. Другими словами, эти колонии являются частями одной обычной колонии с единой ориентацией решёток феррита и цементита по обе стороны от перешейка.

Всё же, на основании наличия двух разных (дуплекс) ориентаций феррита (но не больше) в цементитном каркасе, авторы [3] полагают, что элементарной

колонией (pearlite unit) является образование, в котором «...хотя бы одна составляющая имеет единую ориентацию решётки». По этому определению комплекс с шестью ориентациями цементитных решёток (рис. 2) также является элементарной колонией. Очевидно, что на сопротивление перемещению дислокаций такой комплекс оказывает гораздо большее влияние, чем элементарная колония таких же размеров и конфигурации с единой ориентацией цементитных пластин. С этой точки зрения определение колонии по Хульгрену и Олину является неудачным, хотя правдоподобно отражает процесс образования перлита.

По нашему мнению, элементарной колонией перлита следует называть образование, в котором феррит и цементит являются двумя монокристаллами, сопряжёнными по ориентационным соотношениям Исайчева или Питча.

Выводы

Исследованиями доэвтектоидной стали 36Г2С методами дифракционной микроскопии и микродифракции показано, что:

1. В восьми случаях из ста между эвтектоидным и доэвтектоидным ферритом границы отсутствуют.
2. В соседних колониях перлита, количество которых может достигать шести, феррит может иметь единую ориентацию.
3. Элементарной колонией перлита следует называть образование, в котором феррит и цементит являются монокристаллами, сопряжёнными по ориентационным соотношениям Исайчева или Питча.

Список использованных источников:

1. Гриднев В. Н., Гаврилюк В. Г., Мешков Ю. Я. Прочность и пластичность холоднодеформированной стали. – Киев: «Наукова думка», – 1974, 232 с.
2. Курдюмов Г.В., Утевский Л.М., Энтин Р.И. Превращения в железе и стали. – М.: Наука. – 1977. 238 с.
3. Hultgren A., Ölin H. Nucleation and growth of pearlite. *Jernkontorr. // Ann.*, – 1960, Vol. 144, – P. 356-391.
4. Hillert M. The formation of pearlite. *AIME // Symposium on decomposition of austenite by diffusional processes.*: Intersci. publ., New York, - 1962 – P. 197-237.
5. Сухомлин Г.Д. Кристаллографические особенности перлита доэвтектоидной стали. // ФММ – 1976, т. 42, – вып. 5.– С. 965-970.
6. Утевский Л.М. Дифракционная электронная микроскопия в металловедении – М.: Металлургия. 1973. – 584 с.
7. Эндрус К., Дайсон Д., Киоун С. Электронограммы и их интерпретация. / Пер. с англ. М.П. Усикова, под ред. Л.М. Утевского, – М.: Мир. 1971. – 256 с.
8. Исайчев И. В. Ориентация цементита в отпущенной углеродистой стали. // Журнал технической физики. – 1947, – т. 17. – С. 835-838.
9. Pitsch W. Der Orientierung szusam menhang zwischen Zementit und Ferrit in Pearlit // *Acta Met.* – 1962, – Vol. 10. – P. 79-80 (errata, *Acta Met.*, – 1962, – Vol. 11, – P. 906).