

МЕХАНИЗМ ЗАРОЖДЕНИЯ И РОСТА ПЕРЛИТНЫХ КОЛОНИЙ

**В. И. Большаков, д.т.н., проф., А. В. Бекетов, к.т.н., Г. Д. Сухомлин, д.т.н.,
Д. В. Лаухин, к.т.н., Т. В. Семёнов, маг-р.**

*ГВУЗ «Приднепровская государственная академия
строительства и архитектуры»*

Введение. Перлит является одной из основных структурных составляющих сталей и некоторых сплавов, поэтому изучению его строения и свойств уделяется много внимания [1-5]. Несмотря на это, некоторые вопросы, касающиеся формирования структуры перлита, до настоящего времени остаются дискуссионными. Например, как зарождается колония перлита и какая фаза является ведущей при её росте? Как осуществляется ветвление цементитного каркаса? Каковы кристаллографические параметры фаз в колонии? Как можно управлять структурой и свойствами сталей, содержащих перлит? Актуальность этих вопросов объясняется тем, что свыше 90% металлопродукции содержит перлитную компоненту.

Основные положения. В сталях с содержанием углерода до 1,7% при умеренных скоростях охлаждения может иметь место эвтектоидная реакция; углеродистая сталь с 0,8% углерода является эвтектоидной, аустенитная фаза в такой стали при медленном охлаждении ниже температуры 727°C распадается на две дочерние: α -фазу – феррит и θ -фазу – цементит. Перлитный (или диффузионный) распад аустенита имеет кооперативный характер: рост пластин феррита вызывает рост пластин цементита и наоборот. В результате образуется специфическая структура перлита, состоящая из чередующихся пластин феррита и цементита с соотношением их толщин около 8:1. Существует несколько моделей роста колонии перлита: «бок о бок», когда новая пластина зарождается на поверхности другой и таким образом колония растет в поперечном направлении [1, 2]; первичное прорастание стержней цементита вдоль дислокаций с последующим преобразованием стержней в пластины [3]; поэтапное развитие колонии по схеме: активное ветвление → рост пластин → превращение в ленты → превращение в стержни [4] и другие. Элементарной единицей перлита считается колония. Относительно понятия элементарной колонии существуют несколько определений:

- система параллельных чередующихся пластин феррита и цементита [1-5];
- система двух кристаллов – α и θ фаз, растущих в друг в друге [4, 5];
- несколько систем пластин цементита в одной ферритной матрице [6];
- сложная колония, состоящая из нескольких субколоний с отличающимися направлениями цементитных пластин [7].

Многообразие определений связано с довольно сложной структурой как цементитной, так и ферритной компонент в реальных перлитных колониях. Существует также разница в строении продуктов распада аустенита: в зависимости от кинетики процесса роста одна и та же колония может принимать несколько морфологических видов, которые с позиций развития деформации ведут себя как разные композиционные материалы [8]. Протекание деформационных процессов усложняется тем, что упрочняющая фаза – цементит –

имеет определенные кристаллографические ориентационные связи с ферритом, соответственно пластины феррита и цементитные пластины имеют различные габитусные плоскости, по-разному ориентированы относительно плоскостей и направлений скольжения дислокаций [8].

Свойства перлитных сталей зависят от ряда факторов, главным из которых является характер распределения упрочняющей фазы – цементита. Если химический состав стали отличается от эвтектоидного, то в структуре появляются избыточные фазы: цементит в заэвтектоидных сталях и феррит – в доэвтектоидных. При ускоренном охлаждении перлитные колонии растут быстрее, межпластиночные расстояния уменьшаются, цементитные пластины становятся тоньше, количество углерода (цементита) в единице объема снижается – образуется перлитоподобная структура – квазиэвтектоид. Его свойства могут существенно отличаться от эвтектоидного перлита, поскольку меняется соотношение $\delta_\alpha / \delta_\alpha$ (толщин ферритных δ_α и цементитных δ_α пластин соответственно). Прочностные свойства доэвтектоидной стали снижаются тем сильнее, чем меньше доля перлитной (квазиэвтектоидной) составляющей. С другой стороны, в квазиэвтектоиде межпластиночные расстояния меньше, а удельная поверхность межфазных границ феррит-цементит больше, поэтому сопротивление движению дислокаций увеличивается, прочность возрастает или частично компенсируется. В то же время уменьшение толщины цементитных пластин и увеличение количества дефектов (отверстий, щелей) в них снижает вероятность образования больших скоплений дислокаций у препятствий и пластичность квазиэвтектоида увеличивается [5, 6].

Следует учитывать, что изменение химического состава стали в пределах марочного, а также случайные или целенаправленные изменения технологических параметров изготовления изделия могут оказать влияние на структуру и свойства феррито-перлитных сталей. Понимание механизмов происходящих при этом структурных изменений позволит более осознанно управлять структурой и свойствами указанных сталей.

В соответствии с изложенным, целью работы явилась разработка на основе металлофизического подхода схемы зарождения и роста перлитных колоний в сталях.

Образование зародыша.

Зарождение перлитной колонии ранее практически не рассматривалось, поскольку световые микроскопы имеют недостаточное разрешение, чтобы подтвердить или опровергнуть ту или иную модель, а электронная микроскопия является слишком локальным методом, не позволяющим обнаружить требуемый участок.

Экспериментальные наблюдения показывают, что зарождение колонии происходит обычно на неметаллических включениях. Однако, число колоний обычно значительно превышает число включений, поэтому можно предположить, что зарождение колоний возможно также на других высокоэнергетических дефектах структуры – узлах и тройных стыках границ аустенита.

Обоснованность такого предположения подтверждается тем, что, как стыки, так и узлы, являются поставщиками углерода, атомы которого гораздо подвижнее атомов железа, поэтому существует большая вероятность флуктуационного образования скопления атомов требуемой концентрации.

В первый момент образуется карбидная частица, которая расположена, как правило в точке (узле) пересечения четырёх тройных стыков аустенитных границ или на любой точке тройного стыка. Как только образуется плоский или сферический зародыш цементита, вокруг него возникает зона с пониженной концентрацией углерода в аустените, что даёт толчок для возникновения зародыша α -фазы (рис. 1а), из которой вытесняются атомы углерода (изображены чёрными точками) в близлежащий аустенит, создавая условия для наращивания цементитного слоя (рис. 1б-г). Таким образом, выполняется первое требование перлитной реакции – кооперативное сосуществование α и θ фаз. Это значит, что в процессе роста колонии наиболее активным базовым элементом является граница раздела феррит-цементит, и именно она является «ведущим» звеном, и растёт в сопровождении двух слоёв α и θ фаз, создавая конструкцию колонии перлита.

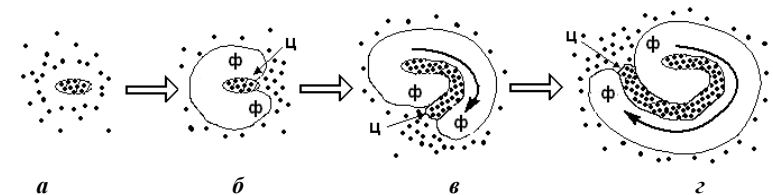


Рис. 1. Предлагаемая схема образования плоского зародыша перлитной колонии.

Дальнейший рост, по нашему мнению, осуществляется наслаиванием двухслойного элемента на собственную «подложку» с образованием первого витка спирального зародыша колонии перлита (рис. 2а-д).

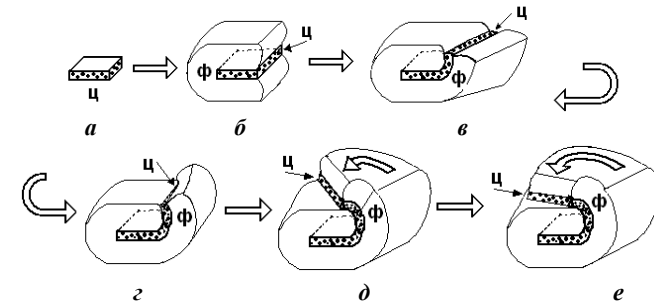


Рис. 2. Этапы образования двухфазного спирального зародыша колонии: а – зародыш цементита; б – зарождение феррита на цементитной подложке; в – изгиб цементитной пластины, вызванный нестабильностью фронта превращения; г – охват цементитом ферритного слоя; д, е – начало первого витка спирали.

На рис. 3а показана предполагаемая схема образования зародыша (его цементитной составляющей), а на рис. 3б вид осевого сечения спирального участка. Далее происходит его развитие в виде спаренной феррито-цементитной спирали путём многократного повторения последующих витков,

что обеспечивает рост колонии в направлении оси Z , а уже образовавшиеся витки продолжают разрастание в направлениях X и Y (рис. 3в).

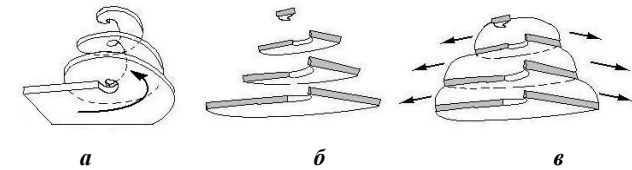


Рис. 3. Развитие спирального участка колонии перлита:

а – цементитный каркас; *б* – осевое сечение спирали; *в* – боковой рост колонии путём перемещения фронта превращения.

Такой механизм роста на ранней стадии образования колонии перлита обеспечивает пространственное (трехмерное) ее распространение, при этом не требуется зарождение пластин по механизму «бок о бок», как это предлагается в модели Мейла [1]. Кроме того, спиральный рост объясняет бикристалльное строение колонии, в то время как зарождение «бок о бок» допускает независимую ориентацию новых пластин.

В осевом сечении спиральные участки выглядят как обычные пластинчатые колонии, поэтому доказать, что данная колония содержит спиральный компоненту, не представляется возможным. В благоприятных случаях, когда сечение проходит почти параллельно плоскости пластин, спиральная колония может выявиться чётко. Такой случай приведен на рис. 4, где можно видеть две спиральные колонии (4*а* и 4*б*), расположенные на небольшом расстоянии друг от друга, что показывает, что такие случаи не единичны.

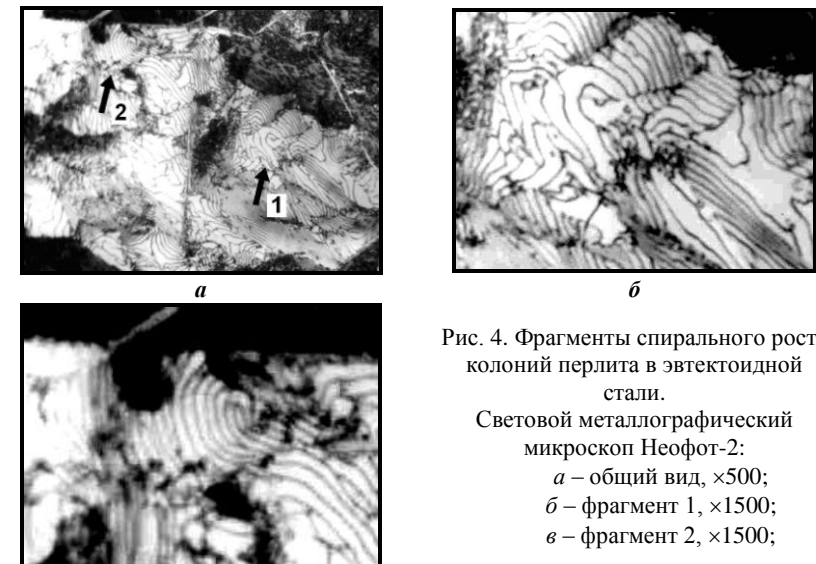


Рис. 4. Фрагменты спирального роста колоний перлита в эвтектидной стали.

Световой металлографический микроскоп Неофот-2:

а – общий вид, $\times 500$;

б – фрагмент 1, $\times 1500$;

в – фрагмент 2, $\times 1500$;

Образование дефектов.

Перед фронтом роста колонии существуют дефекты в аустените: отдельные дислокации или субзеренные малоугловые границы, вокруг которых обычно находятся обеднённые по углероду участки (рис. 5а). Это приводит к тому, что растущая система пластин, встречая на своём пути такую зону, вынуждена приостановить рост одной из цементитных пластин таким образом, что в ней образуется углубление (рис. 5б). Диффузионные потоки углерода (показаны стрелками на рис. 5а и б) перераспределяются так, что появляются потоки вдоль оси Z, которые поддерживают ширину щели постоянной и близкой к действующему межпластиночному расстоянию в колонии (рис. 4в). В результате щель заполняется ферритной фазой наравне с другими участками фронта превращения.

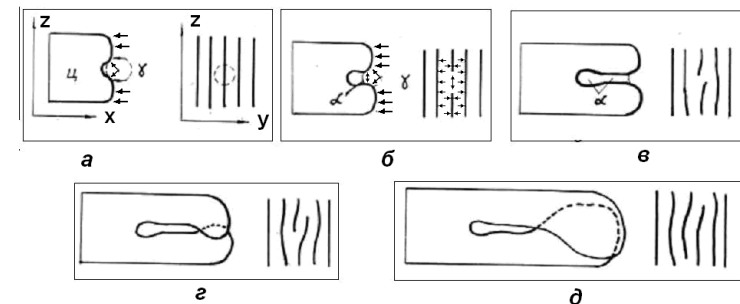


Рис. 5. Схема образования дефектов: а, б, в – стадии образования устойчивой щели; г, д – ветвление пластин.

Такие щели редко залечиваются в процессе дальнейшего роста колонии, так как они способствуют сокращению поверхности межфазных границ и снижению избыточной поверхностной энергии. На рис. 6а показана цементитная пластина, извлечённая с глубоко протравленного шлифа (сталь У8), которая содержит щель постоянной ширины. На снимке тонкой фольги из стали 36Г2С (рис. 6б) видны широкие ленты со щелями (отмечены малыми стрелками) и узкие ленты в виде небольших ромбов и параллелограммов.

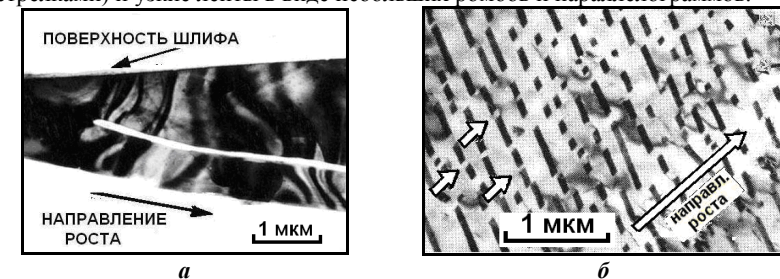


Рис. 6. Щели и ленты цементита в перлите: а – пластина цементита, содержащая стабильную щель. Реплика с извлечением. б – ленточный цементит в перлитной колонии. Тонкая фольга.

Показательно, что кромки всех цементитных фрагментов по всей колонии имеют одинаковое направление и параллельны направлению роста, которое отмечено большой стрелкой. Дифракционные картины показывают, что колония является бикристаллом: цементит ветвится в ферритной матрице, габитусными плоскостями могут быть $(001)_ц$, $(101)_ц$ и $(\bar{1}01)_ц$ цементита, а направлением роста неизменно выступает $[010]_ц$.

Ветвление пластин.

Если на фронте превращения существует нестабильность условий, например, необходимость увеличения числа пластин в колонии, то по мере движения фронта превращения края щели могут отклоняться от основного габитуса и наращиваться в направлении оси Z , (рис. 4в, з). В итоге на таком участке создаётся дополнительная пластина в направлении оси Y (сравните: 4а, –5 пластин, а 4в – 6 пластин). Это приводит к такому же результату, как и зарождение «бок о бок», но в полном согласии с постулатами перлитной реакции.

Образование лент и стержней.

Участки фронта превращения, содержащие одну или несколько щелей, перемещаются быстрее других, чем способствуют ускорению распада аустенита. В ряде случаев, например, при ускоренном охлаждении, щели инициируют появление в соседних пластинах таких же дефектов, поэтому с течением времени пластины распадаются на узкие ленты, отстоящие друг от друга на таких же расстояниях, как и пластины. По мере дальнейшего роста ленты переходят в стержни гексагонального сечения. Массовое преобразование пластин в ленты, а лент в стержни оправдано с точки зрения снижения общей энергии колонии [4, 10].

Развитие колонии перлита.

Проведенный анализ позволяет предположить, что перлитные колонии в процессе роста проходят несколько стадий, которым присущи свои морфологические виды цементитной составляющей. В общем виде это можно представить следующим образом (рис. 7). На *первой стадии* образуется двухфазный спиралевидный зародыш, дающий начало пластинам феррита и цементита и их возможности прорасти во всех направлениях (рис. 7а). На *второй стадии* пластины увеличиваются в размерах, одновременно приобретая дефекты в цементитной фазе в виде узких щелей, ширина которых поддерживается постоянной и равной действующему межпластиночному расстоянию. При этом же пластины разветвляются путём разрастания краёв щелей (рис. 7б). *Третья стадия* – массовое формирование лент из пластин благодаря увеличению количества щелей (рис. 7в).

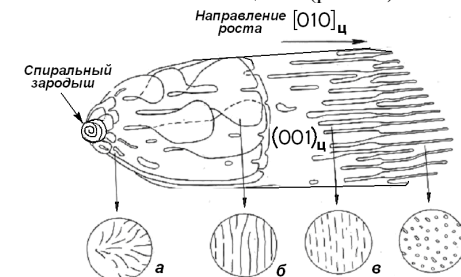


Рис. 7. Пространственная схема развития колонии перлита.

Этот процесс идёт активно, так как увеличение количества щелей способствует ускорению процесса распада аустенита [9]. *Четвёртая, завершающая стадия* – переход узких лент в стержневидную форму, что существенно снижает свободную энергию системы (рис. 8г). При этом фронт роста становится почти плоским и состоящим из ячеек. В центре каждой ячейки находится стержень цементита, к которому со всех сторон из аустенита устремляются потоки углерода, как это происходит при ячеистом распаде в некоторых пересыщенных растворах.

Важно отметить, что все стадии реализуются в условиях наличия диффузии компонентов твёрдого раствора, поэтому для их прохождения требуется время и пространство. По ряду причин некоторые морфологические формы цементитного каркаса могут отсутствовать, например, стержни или ленты, в том случае, если колонии растут в мелком аустенитном зерне, при малом переохлаждении, при низкой температуре и т. д. От этих же факторов зависит и количественное соотношение различных видов морфологии цементита и, следовательно, физические свойства перлитосодержащих сталей.

Выводы.

1. В связи с широким распространением перлитных сталей и существенным влиянием перлита на их свойства, дальнейшее изучение и уточнение его тонкого строения является актуальным.
2. Показано, что в процессе роста колонии перлита претерпевают несколько морфологических переходов: спиралевидный двухфазный зародыш → разрастание пластин и дефектов – устойчивых щелей в них → переход пластинчатого цементита в ленточный → преобразование лент в стержни.
3. Развитие представлений о механизме структурообразования в сталях, содержащих перлитную компоненту, позволит более осознанно управлять их структурой и свойствами.

Список использованной литературы

1. Мейл Р.Ф., Хагель У.К. Аустенитно-перлитное превращение. В кн. Успехи физики металлов. Пер. с англ. М.: Металлургиздат, – 1960, – С. 86-156.
2. Zener C. Kinetics of decomposition of austenite. // Trans. AIME, – 1946, v. 167, –P. 405-417.
3. Бунин К.П., Бунина Ю.К., Мазур В.И. // О зарождении и строении перлита. /МирТОН, – 1971, №10, – С. 6-7.
4. Сухомлин Г.Д. Кристаллогеометрические особенности перлита доэвтектоидной стали. // ФММ, – 1976, т.42, вып. 5, – С. 965-970.
5. Puls M.P., Kirkaldy J.S. The pearlite reaction. // Met. Trans., – 1972, v.3, – P.2777-2792.
6. Hultgren A., Öhlin H. Nucleation and growth of pearlite. // Jernkont. Ann. – 1960. –v. 144, –P.356-391.
7. Бернштейн М.Л., Владимирская Т.Н., Займовский В.А. и др. Влияние высокотемпературной термомеханической изотермической обработки на структуру и механические свойства стали. // Изв. АН СССР, – Металлы. 1979, №2, – С. 130-139.
8. Гриднев В.Н., Гаврилюк В.Г., Мешков Ю.Я. Прочность и пластичность холоднодеформированной стали. Киев.: Наукова думка, –1974. – 231 с.
9. Sundquist B. E. The edgewise growth of pearlite. // Acta Met. – 1968, v. 16, – P. 1413-1427.
10. Кривошеева А.А., Сухомлин Г.Д., Цыба В.Н. О стержневидном цементите в перлитных структурах. // Металлофизика. – 1984. т. 6, №3. – С. 99-100.