МОДЕЛЬ ПЕРЛИТНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ НА ОСНОВЕ ДИСЛОКАЦИОННОГО МЕХАНИЗМА

Парусов В. В., Парусов Э. В., Сагура Л. В., Чуйко И. Н., Сивак А. И., Клименко А. П.

Предложен механизм перлитного превращения: в течение непрерывного охлаждения происходят процессы термопластической деформации переохлажденного аустенита, в результате чего в субструктуре аустенита образуются плоскополигональные стенки, сформированные дислокациями одного знака, дальнейшее упругое взаимодействие дислокаций с атомами углерода обеспечивает мгновенное образование плоских зародышей цементита и феррита, т. е. продольного фронта кристаллизации. При этом расстояния между предварительно сформированными дислокационными стенками – межпластиночное расстояние в колонии перлита. Превращение аустенита в перлит происходит путем образования на зародышах пластин цементита зародышей феррита и последующей раздельной кристаллизации этих фаз. Кристаллизация цементитных и ферритных пластин происходит за счет диффузии углерода от аустенита к цементиту через ферритную пластину и объясняется тем, что коэффициент диффузии углерода в феррите на два порядка выше, чем в аустените, а разность концентраций углерода в пластине феррита на границе феррит/цементит и феррит/аустенит при поперечном росте перлита превышает разность концентраций этого элемента, возникающую между фазами цементит/аустенит и феррит/аустенит при продольном росте перлита.

Запропоновано механізм перлітного перетворення: на протязі безперервного охолодження відбуваються процеси термопластичної деформації переохолодженого аустеніту, внаслідок чого в субструктурі аустеніту утворюються плоскополігональні стінки, сформовані дислокаціями одного знаку, подальша пружна взаємодія дислокацій з атомами вуглецю забезпечує миттєве утворення плоских зародків цементиту та фериту, тобто подовжнього фронту кристалізації. При цьому відстані між заздалегідь сформованими дислокаційними стінками – міжпластинчата відстань в колонії перліту. Перетворення аустеніту на перліт відбувається шляхом утворення на зародках пластин цементиту зародків фериту та подальшої роздільної кристалізації цих фаз. Кристалізація цементитних і феритних пластин відбувається за рахунок дифузії вуглецю від аустеніту до цементиту через феритну пластину і пояснюється тим, що коефіцієнт дифузії вуглецю у фериті на два порядки вище, ніж в аустеніті, а різниця концентрацій вуглецю в пластині фериту на межі ферит/цементит і ферит/аустеніт при поперечному рості перліту перевищує різницю концентрацій цього елементу, що виникає між фазами цементит/аустеніт і ферит/аустеніт при подовжньому зростанні перліту.

The mechanism of pearlitic transformation is proposed herein as follows: in the course of continuous cooling down the undercooled austenite undergoes thermoplastic deformation which results in forming of flat polygonal walls in the austenite substructure. The walls are formed by dislocations of the same direction. Further elastic interaction of the dislocations with carbon atoms ensures forming of the plain nucleation centers of cementite and ferrite, i.e. the lateral crystallization front-line. At that, the distance between the pre-formed dislocation walls is the inter-lamellar spacing of the pearlite colony. The transformation of austenite into pearlite takes place by way of

forming of ferrite nucleation centers on the nuclei of cementite lamellas, and further separate crystallization of these phases. The crystallization of cementite and ferrite lamellas occurs due to the carbon diffusion from austenite to cementite through the ferrite lamellas. The process can be explained as follows. The carbon diffusion ratio in ferrite is two scores higher than that in austenite; the difference of carbon concentration in the ferrite lamella on the border of ferrite/cementite and ferrite/austenite junctions is higher than that of the carbon emerging between the cementite/austenite and ferrite/austenite phases during the lateral growth of perlite.

Парусов В. В. — д-р техн. наук, проф., зав. отд. ТОММ ИЧМ им. З. И. Некрасова НАНУ

Парусов Э. В. — канд. техн. наук, ст. науч. сотр., и. о. зав. отд. ТОММ ИЧМ им. З. И. Некрасова НАНУ
tometal@ukr.ne

Сагура Л. В. — канд. техн. наук, ст. науч. сотр. отдела ТОММ ИЧМ им. З. И. Некрасова НАНУ
slv_metal@mail.ru

Чуйко И. Н. — канд. техн. наук, ст. науч. сотр. отдела ТОММ ИЧМ им. З. И. Некрасова НАНУ
ichuyko@mail.ru

Сивак А. И. — науч. сотр. отдела ТОММ ИЧМ им. З. И. Некрасова НАНУ

Клименко А. П. — канд. техн. наук, доц. каф.КИТМ УГХТУ
klimenko_a_p@ukr.net

ИЧМ им. З. И. Некрасова НАНУ – Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова Национальной академии наук Украины, г. Днепропетровск;

УГХТУ – Украинский государственный химико-технологический университет, г. Днепропетровск.

УДК: 669.017:669.112.227.32

Парусов В. В., Парусов Э. В., Сагура Л. В., Чуйко И. Н., Сивак А. И., Клименко А. П.

МОДЕЛЬ ПЕРЛИТНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ НА ОСНОВЕ ДИСЛОКАЦИОННОГО МЕХАНИЗМА

Согласно [1] эвтектоидное перлитное превращение происходит при переохлаждении гомогенного аустенита ниже критической линии A_{c1} и приводит к образованию пластин феррита, почти не содержащего углерода (0,02 % С), и пластин цементита (6,67 % С). Ширина пластин феррита при таком превращении может достигать 1 мкм, а согласно отношению объемных долей феррита и цементита толщина ферритной пластины ~ в 7,5 раз больше толщины цементитной пластины. Согласно проведенным исследованиям Девенпорта Е. С., Бейна Э., Штейнберга С. С., Вефера Ф. было установлено, что при изотермическом распаде аустенита (t ~ 585 °С) в сталях образование пластин феррита и цементита может полностью завершиться всего за ~ 5 с [2], что свидетельствует о скоротечности протекания процесса перлитного превращения. Мощный толчок к развитию современных представлений о перлитном превращении дала в 1929 г. работа Д. Льюиса [3].

Очевидно, что процесс протекания перлитного превращения должен иметь определенную модель, позволяющую в той или иной степени обоснованно с научной точки зрения раскрыть суть и сам механизм процессов, происходящих при перлитном превращении.

Одним из первых механизм роста перлита разработал К. Зинер. Он считал, что рост перлита происходит в условиях локального равновесия, поэтому граничные концентрации должны быть такими же, как для равновесной фазовой диаграммы железо-углерод [2]. Однако позднее эта теория была подвергнута небезосновательной критике и выдвинуты различные теории роста перлита Хиллертом, Д. Тарнбаллом, К. Брандтом, Б. Я. Любовым, Фишером и другими выдающимися учеными. В большинстве случаев результаты исследований сводились к описанию физико-математических моделей, основанных на разности концентраций углерода диаграммы Fe-C, энергии активации диффузии, поверхностной энергии и других показателях [2].

Механизм образования перлита, предложенный И. Л. Миркиным, а в последующем развитый Р. Мейлом, имел следующий смысловой характер: ведущей фазой, которая выделяется из аустенита при охлаждении, является цементит, образующийся на поверхности аустенитных зерен. Прилегающие к цементитной пластине объемы аустенита обедняются углеродом и рядом с цементитной пластиной возникает ферритная. Соседний объем аустенита обогащается углеродом и снова образуется пластина цементита [4].

В работе [5] автор считает, что ведущей фазой при перлитном превращении может выступать как феррит, так и цементит, а их зарождение происходит также по границам аустенитных зерен. Механизм протекания перлитного превращения объясняется тем, что на фронте раздела аустенит-цементит при утолщении пластин цементита, аустенит обедняется углеродом, вследствие чего происходит полиморфное превращение аустенита в феррит, а при последующем утолщении пластин феррита углерод оттесняется в аустенит и происходит образование новых пластин цементита.

В работах [4, 5] отмечено, что рост пластин феррита и цементита происходит как в торцевом (продольном), так и в боковом (поперечном) направлениях. Наибольшие колебания углерода в составе аустенита наблюдаются перед фронтом; вблизи ферритных пластин аустенит, обогащен углеродом, вблизи цементитных пластин – обеднен. Неоднородность концентраций приводит к диффузионному переносу углерода из участков, обогащенных углеродом, к участкам с пониженной концентрацией углерода, что обеспечивает даль-

нейший рост ферритных и цементитных пластин. Подобное трактование вполне соответствует научным положениям теории роста перлита К. П. Бунина [6].

На основании анализа существующих теорий роста перлита можно сделать вывод о том, что перлитное превращение в стали является диффузионным процессом перераспределения углерода, в силу возникающей разницы концентраций, при котором происходит кристаллизация пластин феррита и цементита как в продольном, так и поперечном фронтах.

Но так ли все обстоит на самом деле? И самый главный вопрос – почему при описании различными исследователями механизмов перлитного превращения отсутствует рассмотрение вопросов, связанных с процессами термопластической деформации металла, происходящими при его охлаждении до температур перлитного превращения, и возникновением впоследствии дислокационной субструктуры? Согласно работе [7] в общем виде показано влияние образующейся дислокационной структуры на изменение дисперсности перлита в процессе деформационно-изотермической обработки, а в работе [8] сделан вывод о том, что ветвление цементита при изотермическом распаде аустенита, возможно, связано с дислокационной структурой аустенита перед фронтом распада. Дальнейшее развитие дислокационный механизм образования перлита так и не получил, за исключением научных положений, изложенных в работе [9].

В работах [6, 10] обоснован и научно подтвержден механизм перлитного превращения в сталях на базе регулярных дислокационных построений, связанных с термопластической деформацией, возникающей в процессе охлаждения аустенита как в областях температур, превышающих, так и совпадающих, с перлитным превращением.

Описанный механизм образования пластинчатого перлита по своей природе является дислокационным и устанавливает генетическую связь между субструктурой переохлажденного аустенита и морфологией перлита при температурах перлитного превращения.

Целью работы является пояснение механизма (модели) перлитного превращения, который объясняет скоротечность протекания перлитного превращения.

Схематическое изображение, иллюстрирующее регулярные дислокационные построения в процессе образования пластинчатого перлита по дислокационному механизму, представлено на рис. 1, а схема процесса полигонизации заимствована из работы [11].

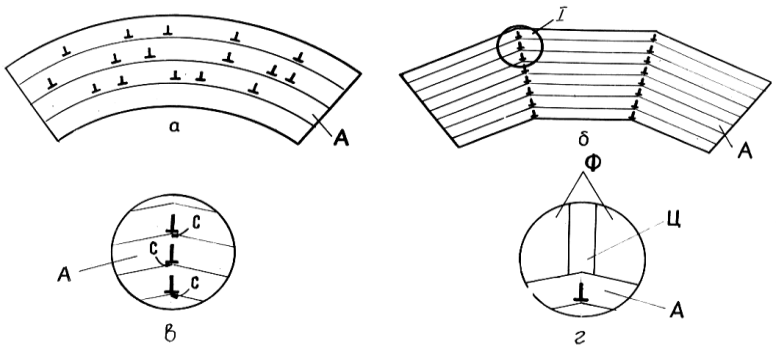
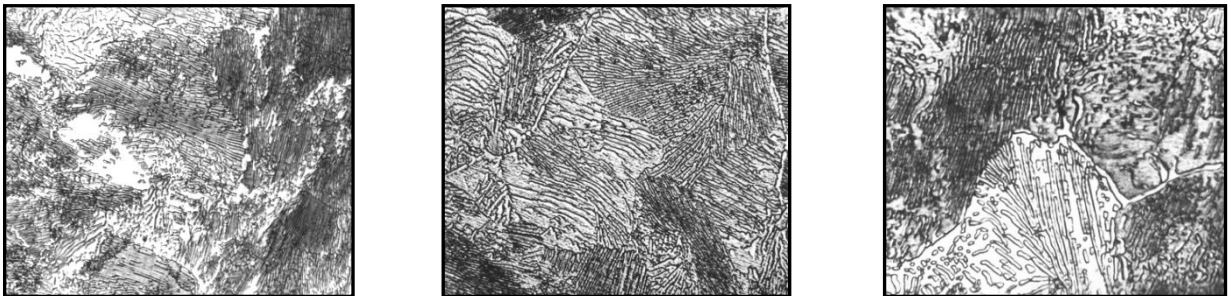


Рис. 1. Схема превращения аустенита эвтектоидного состава в пластинчатый перлит:

а – образование избытка дислокаций одного знака вследствие термопластической деформации аустенита тепловыми напряжениями; б – полигонизация, перераспределение дислокаций, приводящее к образованию дислокационных стенок и подразделению кристалла на субзерна-полигоны; в, г – процессы в области I, выделенной на схеме б; в – упругое взаимодействие атомов углерода (С) с дислокациями, образующими стенки; г – процесс эвтектоидного превращения

Расстояние между плоскими дислокационными стенками определяется температурой процесса полигонизации, снижение температуры уменьшает расстояние между стенками.

С целью дополнительного подтверждения дислокационной природы перлитного превращения и образования пластинчатого перлита был проведен эксперимент, изложенный в работе [9, 12]. Микроисследования показали, что массивный образец имеет структуру перлита с разорванной ферритной сеткой, а тонкий – перлита со сплошной цементитной сеткой. В связи с тем, что массивный и тонкий образцы не различались по химическому составу и условиям охлаждения, то образование в них различных структур не может быть объяснено с точки зрения общепринятых известных научных положений (рис. 2).



а б в

Рис. 2. Микроструктура исследуемой стали в массивном (а, ×800) и тонком (б, в, ×1600) образцах:

а, б – поперечный шлиф; в – продольный

Объяснить механизм зарождения структур перлита в массивном и тонком образцах исследуемой стали целесообразно следующим образом: аустенит массивного и тонкого образцов претерпевает термопластическую деформацию как в процессе нагрева, так и охлаждения. В образцах обоих типов устойчивость возникающих при термопластической деформации дефектов различна, поскольку в тонких образцах облегчен их сток на поверхность. Такая точка зрения может быть дополнительно подтверждена работой С. С. Дьяченко [13], в экспериментах которой роль тонкого образца выполнял порошок, а массивного – компактная сталь.

В массивном образце, имеющем повышенную плотность дефектов кристаллического строения, большее количество углерода связано с этими дефектами, образующих сегрегации Коттрелла [14].

В имеющем сравнительно низкую плотность несовершенств кристаллического строения тонком образце, меньшее количество углерода связано с дефектами и, следовательно, большее его количество (по сравнению с массивным образцом) находится в твердом растворе, способствуя пересыщению аустенита (по сравнению с массивным образцом) углеродом и образованию цементитной сетки по границам его зерен. И хотя, по данным [15], количество углерода, связанного с дефектами кристаллического строения аустенита, весьма мало и не влияет существенно на состав аустенита, проведенный эксперимент позволяет утверждать, что изменения концентраций углерода в аустените с повышенной и пониженной плотностью дефектов все же являются достаточными для проявления различий в структурообразовании при его превращениях.

Необходимо отметить, что при проведении описанного эксперимента, было выявлено несоответствие ранее установленным научным положениям работы [16], согласно которой авторы считают, что в случае протекания перлитного превращения при малых степенях переохлаждения в микроструктуре стали образуется зернистый перлит. Исследуемые образцы по содержанию углерода условно соответствуют эвтектоидному составу (C = 0,81 %), а скорость их охлаждения при проведении эксперимента составляла ~ 0,011°C/c, однако зернистый перлит при проведении металлографических исследований в микроструктуре не выявлен. Такая интерпретация справедлива в том случае, если перлитное превращение происходит при распаде гомогенного аустенита. Таким образом, перлитное превращение, протекаю-

щее при охлаждении гомогенного аустенита, всегда приводит к образованию перлита с пластинчатой морфологией и обусловлено кинетическим, а не термодинамическим фактором.

Как известно, в процессе охлаждения металлопроката по его сечению возникает градиент температур, который обусловлен неодинаковой скоростью изменения температуры, что вызывает неравномерное тепловое сжатие последовательно расположенных объемов стали и приводит к образованию тепловых напряжений и деформации [17]. Важной особенностью данного вида термопластической деформации является ее необратимость при любых видах тепловой обработки. Поскольку процессы охлаждения и нагрев взаимосвязаны с градиентом температуры по его сечению, то возникающие тепловые напряжения и обусловленная ими деформация возникают во всех случаях между металлопрокатом и охлаждающей средой.

Следовательно, в стали, нагретой до температур аустенитизации, и в дальнейшем подвергнутой охлаждению ниже критической точки A_{r1} происходят процессы термопластической деформации. При этом необходимо отметить, что с увеличением скорости охлаждения повышаются тепловые напряжения и, следовательно, уровень термопластической деформации, что собственно и должно быть предопределяющим фактором, который формирует межпластиночное расстояние в перлите.

Влияние термопластической деформации на формирование субструктуры было подтверждено на стали аустенитного класса с пониженным содержанием углерода, марки 03Х18Н11, выбор которой обусловлен стремлением исключить влияние структурных напряжений.

В процессе исследования образцы стали марки 03Х18Н11 (размеры образцов 20×20×1,5 мм) подвергали нагреву до температуры 1050 °С, выдержке в течение 20 минут, последующему охлаждению в соляной ванне с температурой расплава 300 °С в течение 10 секунд и далее на спокойном воздухе.

При микроструктурном анализе образцов были выявлены двойники, образование которых свидетельствует о протекании пластической деформации. На фольгах, изготовленных из образцов стали 03Х18Н11, подвергнутым выше описанному режиму термической обработки, при электронно-микроскопическом исследовании выявлены регулярные дислокационные построения (рис. 3). Следует отметить, что одним из недостатков, имеющим место при исследовании микроструктуры под электронным микроскопом, является то, что дислокационные построения в большинстве случаев разрушаются под действием энергии электронного пучка. Трудность изучения субструктуры металлов с применением электронного микроскопа также подтверждена авторами работы [14].

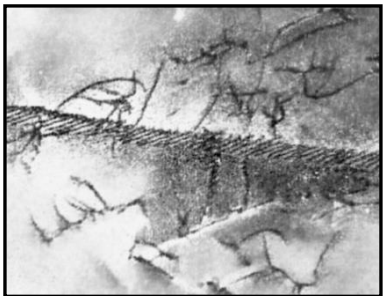
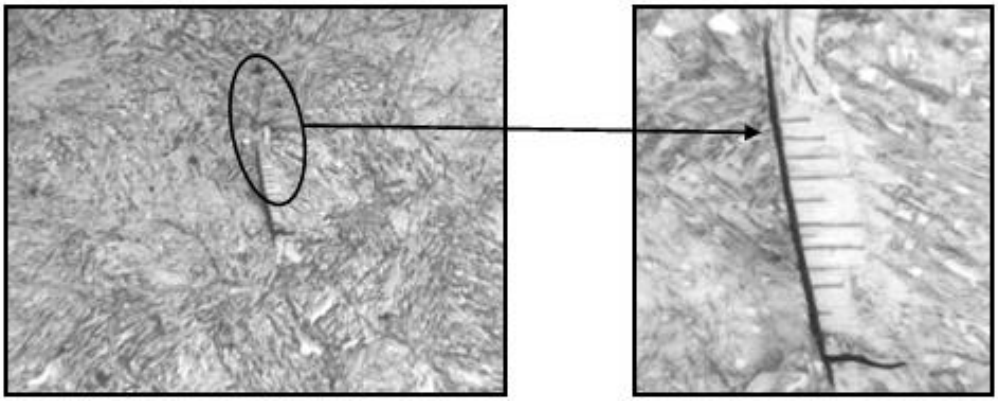


Рис. 3. Возникновение дислокационных построений в стали аустенитного класса 03Х18Н11 (×20000)

Полученные данные позволили установить, что в процессе обычного охлаждения аустенит претерпевает пластическую деформацию и в нем, наряду с единичными дислокациями, возникают регулярные построения (дислокационные стенки).

В стали марки 85 диаметром 11,0 мм, охлажденной от температуры аустенитизации 970 °С до температуры A_{c1} + 20 °С, выдержкой на воздухе в течение 5 секунд и последующей закалкой, были выявлены субколонии грубодисперсного перлита (рис. 4). Это дает основа-

ние утверждать, что в верхней области субкритических температур (вблизи линии A_{c1}) перлитное превращение начинается с зарождения отдельных субзерен перлита, прилегающих к границе аустенитного зерна. Процесс перлитного превращения происходит последовательно, чем объясняется сравнительно большая продолжительность такого превращения в области верхних субкритических температур.



а б

Рис. 4. Образование субколонии грубодисперсного перлита в стали марки 85:
а – ×500; б – ×1700, выделенный участок микроструктуры (а)

Данное утверждение вполне соответствует основным положениям классической теории: с уменьшением степени переохлаждения скорость распада, зарождения и роста кристаллов уменьшается. Одновременно с этим, также уменьшается и степень термопластической деформации – межпластиночное расстояние в перлите возрастает, что отчетливо проиллюстрировано на рис. 4.

На основании обобщенных научных положений, а также проведенных исследований, связанных с особенностями структурообразования в сталях перлитного класса, представляется возможным предложить механизм (модель) перлитного превращения, схема которого приведена на рис. 5.

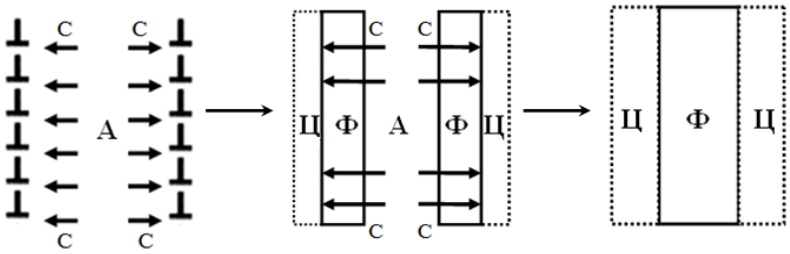


Рис. 5. Схема механизма (модели) перлитного превращения (А – аустенит; Ф – феррит; Ц – цементит; С – углерод)

Суть предложенного механизма заключается в следующем: в течение непрерывного охлаждения происходят процессы термопластической деформации переохлажденного аустенита, в результате чего в субструктуре аустенита образуются плоскополигональные стенки, сформированные дислокациями одного знака, дальнейшее упругое взаимодействие дислокаций с атомами углерода обеспечивает мгновенное образование плоских зародышей цементита и феррита, т. е. продольного фронта кристаллизации.

При этом расстояния между предварительно сформированными дислокационными стенками есть ни что иное, как будущее межпластиночное расстояние в колонии перлита.

Превращение аустенита в перлит происходит путем образования на зародышах пластин цементита зародышей феррита и последующей раздельной кристаллизации этих фаз за счет аустенита, граничащего с близлежащими ферритными зародышами. Раздельная кристаллизация цементитных и ферритных пластин происходит за счет диффузии углерода от аустенита к цементиту через ферритную пластину и объясняется тем, что коэффициент диффузии углерода в феррите на два порядка выше, чем в аустените, а разность концентраций углерода в пластине феррита на границе феррит/цементит и феррит/аустенит при поперечном росте перлита превышает разность концентраций этого элемента, возникающую между фазами цементит/аустенит и феррит/аустенит при продольном росте перлита.

Предложенный механизм по своей природе является дислокационно-диффузионным, он объединяет в себе все известные в настоящий момент научные положения и разъясняет причину скоротечности перлитного превращения при распаде гомогенного аустенита. Так, согласно предложенному механизму (модели) образование продольного фронта кристаллизации происходит мгновенно (за счет образования дислокационных построений), а поперечный фронт кристаллизации обеспечивает дальнейший рост пластин феррита и цементита. Так как диффузия углерода проходит одновременно (в обе стороны) по направлениям к предварительно сформированным дислокационными стенками зародышам цементита, а максимальная скорость диффузии, скорость роста и зарождения центров кристаллизации при распаде аустенита соответствует интервалу температур 560–530 °С [14], то представляется возможным именно этими факторами объяснить скоротечность протекания перлитного превращения.

Дополнительным подтверждением предложенного механизма превращения аустенита в перлит может быть работа [6], в которой автор объясняет механизм прохождения эвтектоидного превращения перепадом концентраций углерода в переохлажденном аустените. Вследствие возникающего перепада концентраций, углерод переносится в аустените от феррита к цементиту. При совместном росте феррита и цементита, цементит изолирован от аустенита прослойкой феррита, и эвтектоидный распад аустенита связан с диффузией углерода через ферритный слой.

Такого же мнения в своих работах придерживался и Фишер [2], который предположил, что из трех фаз, участвующих в образовании перлита, самым высоким коэффициентом диффузии обладает феррит (коэффициент диффузии на два порядка превышает аналогичный коэффициент аустенита), в связи с чем основной диффузионный поток атомов углерода протекает в α-фазе от фронта раздела аустенит/феррит к границе феррит/цементит.

ВЫВОДЫ

1. На основании обобщенных научных положений и проведенных в настоящей работе исследований, предложен механизм (модель) перлитного превращения, который объясняет скоротечность протекания перлитного превращения. Суть предложенного механизма заключается в следующем: в процессе непрерывного охлаждения происходят процессы термопластической деформации переохлажденного аустенита, в результате чего в субструктуре аустенита образуются плоскополигональные стенки, сформированные дислокациями одного знака, дальнейшее упругое взаимодействие дислокаций с атомами углерода обеспечивает мгновенное образование плоских зародышей цементита и феррита, т. е. продольного фронта кристаллизации. При этом расстояния между предварительно сформированными дислокационными стенками есть ни что иное, как будущее межпластиночное расстояние в колонии перлита. Превращение аустенита в перлит происходит путем образования на зародышах пластин цементита зародышей феррита и последующей раздельной кристаллизации этих фаз за счет аустенита, граничащего с близлежащими ферритными зародышами. Кристаллизация цементитных и ферритных пластин происходит за счет диффузии

углерода от аустенита к цементиту через ферритную пластину и объясняется тем, что коэффициент диффузии углерода в феррите на два порядка выше, чем в аустените, а разность концентраций углерода в пластине феррита на границе феррит/цементит и феррит/аустенит при поперечном росте перлита превышает разность концентраций этого элемента, возникающую между фазами цементит/аустенит и феррит/аустенит при продольном росте перлита.

2. Установлено, что даже при очень медленных скоростях охлаждения ~ 0,011 °С/с, распад гомогенного аустенита всегда происходит с образованием перлита пластинчатой морфологии. Это обусловлено кинетическим, а не термодинамическим фактором.

3. Показаны особенности зарождения субзерен перлита в области верхних субкритических температур. Установлено, что превращение начинается с зарождения отдельных субзерен перлита, прилегающих к границе аустенитного зерна. Дальнейший процесс перлитного превращения происходит последовательно, чем объясняется сравнительно большая продолжительность такого превращения в области верхних субкритических температур.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гуляев А. П. Металловедение / А. П. Гуляев. – М. : Металлургия, 1986. – 542 с.*
2. *Перлит в углеродистых сталях / В. М. Счастливцев, Д. А. Мирзаев, И. Л. Яковлева [и др.]. – Екатеринбург : УрО РАН, 2006. – 311 с.*
3. *Физические основы электротермического упрочнения стали / В. Н. Гриднев, Ю. Я. Мешков, С. П. Ашкадеров, В. И. Трефилов. – К. : Наук. Думка, 1973. – 335 с.*
4. *Энтин Р. И. Превращения аустенита в стали / Р. И. Энтин – М. : Металлургиздат, 1960. – 252 с.*
5. *Новиков И. И. Теория термической обработки / И. И. Новиков. – М. : Металлургия, 1978. – 392 с.*
6. *Бунин К. П. Металлография / К. П. Бунин, А. А. Баранов. – М. : Металлургия, 1970. – 256 с.*
7. *Тушинский Л. И. Теория и технология упрочнения металлических сплавов / Л. И. Тушинский. – Новосибирск : Наука, 1990. – 306 с.*
8. *Бунин К. П. О зарождении и строении перлита / К. П. Бунин, Ю. К. Бунина, В. И. Мазур // МиТОМ. – М. : Металлургия, 1971. – № 10. – С. 6–7.*
9. *Развитие теоретических представлений о перлитном превращении в стали / В. В. Парусов, Э. В. Парусов, О. В. Парусов [и др.] // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии : сб. научн. тр. – Днепропетровск : Візіон, 2013. – Вып. 27. – С. 200–204.*
10. *Губенко С. И. Деформация металлических материалов / С. И. Губенко, В. В. Парусов. – Днепропетровск : Арт-пресс, 2006. – 316 с.*
11. *Новиков И. И. Дефекты кристаллического строения металлов / И. И. Новиков. – М. : Металлургия, 1983. – 231 с.*
12. *Механизм перлитного превращения в углеродистой стали / Э. В. Парусов, В. В. Парусов, Л. В. Сагура, И. Н. Чуйко // Научные труды Винницкого национального технического университета. – 2015. – № 2. – С. 1–5.*
13. *Дъяченко С. С. Образование аустенита в железоуглеродистых сплавах / С. С. Дъяченко. – М. : Металлургия, 1983. – 231 с.*
14. *Бернштейн М. Л. Термомеханическая обработка стали / М. Л. Бернштейн, В. А. Займовский, Л. М. Капуткина. – М. : Металлургия, 1983. – 480 с.*
15. *Капуткина Л. М. Состояние мартенсита после высокотемпературной термомеханической обработки / Л. М. Капуткина, М. Л. Бернштейн, М. А. Штремель // ФХОМ. – 1974. – № 1. – С. 71–78.*
16. *Бернштейн М. Л. Металловедение и термическая обработка стали. Т.1 / М. Л. Бернштейн, А. Г. Рахштадт. – 2 изд. – М. : Металлуриздат, 1961. – 445 с.*
17. *Термическое упрочнение проката / К. Ф. Стародубов, И. Г. Узлов, В. Я. Савенков [и др.] – М. : Металлургия, 1970. – 368 с.*

Статья поступила в редакцию 25.09.2015 г.