

УДК 669.15-194.53:669.15-784-194

Э. В. Парусов, к. т. н.; В. В. Парусов, д. т. н., проф.; Л. В. Сагура, к. т. н.;
И. Н. Чуйко, к. т. н.

МЕХАНИЗМ ПЕРЛИТНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ В УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

Описан дислокационный механизм перлитного превращения в углеродистой стали. Генезис пластинчатого перлита определяется плоскополигональными стенками из дислокаций, образующимися при термопластической деформации, вызванной процессом охлаждения аустенита. Показано, что кристаллизация пластинчатого перлита происходит, в первую очередь, за счет торцевого (продольного) роста пластинчатых зародышей цементита, а во вторую очередь, – за счет поперечной кристаллизации пластин цементита и феррита, которая, по всей видимости, протекает по механизму раздельной кристаллизации пластин цементита и феррита за счет переноса углерода от аустенита к цементиту через ферритные пластины в пределах межпластиночного расстояния.

Ключевые слова: перлитное превращение, дислокационный механизм, углеродистая сталь.

Существует много теорий образования перлита [1]. Следует отметить, что преимущественно, эти теории содержат физико-математические модели процессов перлитного превращения аустенита в стали.

Необходимо подчеркнуть, что перлит представляет собой бикристалл [1], состоящий из кристаллов феррита и цементита, однако механизм образования пластинчатого перлита изучен в настоящее время недостаточно полно.

Известен дислокационный механизм образования перлита [2, 3]. Пластинчатая морфология цементита и феррита в перлите вызвана следующими особенностями механизма превращения: термопластической деформацией переохлажденного аустенита, обусловленной процессом его охлаждения, и образованием полигонизованной структуры в виде плоских дислокационных стенок, перпендикулярных плоскостям легкого скольжения; регулярным расположением (расстоянием) в аустените плоских дислокационных стенок, которое определяет термодинамика процесса и тем меньше, чем больше переохлаждение аустенита; упругим взаимодействием дислокаций, составляющих плоские стенки, с атомами углерода и образованием вследствие этого плоских зародышей цементита.

Согласно [4] зависимость межпластиночного расстояния в перлите от степени переохлаждения подчиняется параболическому закону, в соответствии с которым наибольшие значения межпластиночного расстояния в перлите соответствуют малым переохлаждениям, а наименьшие – большим переохлаждениям, т.е. скорость изменения межпластиночного расстояния уменьшается с увеличением переохлаждения. С повышением скорости охлаждения аустенита при температурах ниже A_1 межпластиночное расстояние в перлите уменьшается. Это можно объяснить меньшим развитием процессов аннигиляции дислокаций с ростом скорости термопластической деформации, обусловленной скоростью охлаждения [5]. При этом логично предположить, что межпластиночное расстояние в перлите определяют расстоянием между плоскополигональными стенками в аустените, сформированными перед превращением его в перлит.

Подтверждением дислокационного механизма перлитного превращения в стали У8А является то, что в процессе термопластической деформации, обусловленной охлаждением от 950 °С до 670 °С со средней скоростью 40 °С/ч, а затем с печью аустенит имеет различную структуру в зависимости от массивности (размеров) смежных образцов, отобранных от квадрата 10×10 мм: в массивном (7...8 мм) образце – малое количество структурно

свободного феррита и перлит, а в тонком (0,4...0,5 мм) – сплошная цементитная сетка и перлит [6]. Это объясняется тем, что в тонких образцах облегчен сток дефектов кристаллической решетки на их поверхность, следовательно, меньшее количество углерода связано с дефектами и 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 перлитных колоний.

Согласно [7], однородный (гомогенный) аустенит всегда превращается в пластинчатый перлит, а неоднородный аустенит при всех степенях переохлаждения – в зернистый перлит.

Научно-технологические разработки по скоростному электропатентированию (СЭП) углеродистых сталей [8, 9] также можно трактовать с привлечением дислокационного механизма перлитного превращения. Эти разработки заключаются в следующем: гомогенный аустенит дозвлектоидной стали необходимо переохладить без его распада до интервала температур 300...600 °С. После переохлаждения одну часть образцов охлаждали на воздухе в течение времени, необходимого для завершения распада аустенита, а затем в воде; другую часть после определенной паузы при температуре переохлаждения подвергали скоростному электронагреву. Было показано, что аустенит первой части образцов распадался по кинетике, близкой соответствующей изотермической диаграмме, а другой части – в интервале температур ~ 500...670 °С, при чем время превращения аустенита в перлит во втором случае составляло 1...2 с. Микроструктура электропатентированной стали 60 представлена на рис. 1 [8].



Рис. 1. Микроструктура электропатентированной стали, $\times 30000$

С учетом полученных данных предложенный нами механизм кристаллизации пластинчатого перлита целесообразно рассмотреть после изложения закономерностей распада гомогенного аустенита на зернистый перлит.

Согласно [10], в зернистый перлит гомогенный аустенит превращается лишь после термоциклической обработки (ТЦО) в интервале температур, ограниченных A_1 и M_n , и изотермической выдержке при верхней температуре цикла.

В работе [11] было показано, что структура стали У8 после одного термоцикла гомогенного аустенита в изотермических средах (от 300 до 700 °С), последующей выдержке в течение 10 и 20 с и закалки в воде имеет вид, представленный на рис. 2.

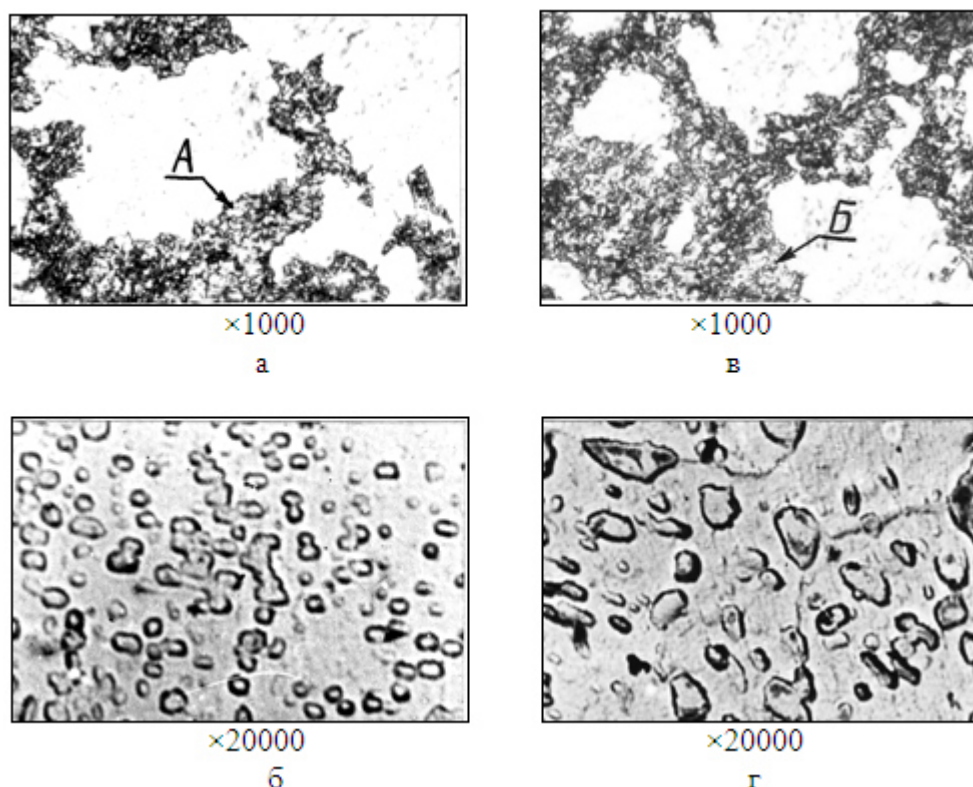


Рис. 2. Микроструктура высокоуглеродистой стали после подстуживания до 300 °С и отогрева с последующей выдержкой в течение 10 (а, б) и 20 (в, г) секунд при 700 °С и закалки в воду: б, г – микроструктуры участков А и Б соответственно

Как видно из рис. 2, микроструктура стали состоит из светлых участков, представляющих собой бесструктурный мартенсит, и темных участков – мелкодисперсного зернистого перлита. В работе [11] получение такой микроструктуры объясняют тем, что образование зернистого перлита происходит непосредственно при распаде гомогенного аустенита, а не путем образования пластинчатого перлита и последующей его трансформации в зернистый перлит.

Однако затем было установлено [10], что морфология перлита (пластинчатая или зернистая) зависит от длительности выдержки при верхней температуре цикла предварительно переохлажденного до нижней температуры цикла аустенита углеродистой стали.

Этот научный факт можно объяснить следующим образом: при малой продолжительности выдержки (3 с) при 700 °С предварительно переохлажденного аустенита стали У8А и последующем охлаждении на воздухе образуется пластинчатый перлит (рис. 2, а), а при выдержке 10 с начинается сфероидизация структуры, которая полностью завершается при выдержке 140 с. Логично предположить, что в процессе ТЦО на плоских дислокационных стенках сначала образуются пластинчатые зародыши цементита, которые сфероидизируются благодаря возникновению в процессе полного цикла ТЦО ячеистой дислокационной субструктуры.

Следовательно, предложенный нами механизм кристаллизации пластинчатого перлита можно изложить следующим образом.

1. В процессе термопластической деформации, возникающей при охлаждении гомогенного аустенита, образуются плоскополигональные дислокационные стенки, которые взаимодействуют с атомами углерода в γ -фазе и при температуре ниже A_1 становятся центрами зарождения пластин цементита.

2. В первую очередь, кристаллизация пластинчатого перлита происходит за счет продольного роста пластинчатых зародышей цементита, а затем – за счет поперечной

кристаллизации возникших пластин цементита и феррита в пределах межпластинчатого расстояния.

Поперечная кристаллизация пластин цементита и феррита связана с диффузионным переносом углерода от аустенита к цементиту через ферритный слой (пластины). При этом при практически равных температурах коэффициент диффузии углерода в феррите на два порядка выше, чем в аустените [12]. По мере диффузии углерода в феррите от аустенита к цементитным пластинам происходит утолщение пластин цементита и дальнейшая переупаковка $\gamma \rightarrow \alpha$ решетки. Таким образом, перлитное превращение аустенита происходит по механизму раздельной кристаллизации пластин цементита и феррита [13].

При температуре минимальной устойчивости переохлажденного аустенита (500...530 °С) максимальная скорость превращения его в пластинчатый перлит обусловлена минимальным расстоянием между пластинчатыми зародышами цементита, вследствие чего существенно сокращаются пути диффузии углерода при предложенном механизме его превращения.

Выводы

1. Генезис пластинчатого перлита определяется плоскополигональными стенками из дислокаций, которые образуются при термопластической деформации, вызванной процессом охлаждения аустенита.

2. При температуре аустенита ниже точки A_1 плоскополигональные дислокационные стенки становятся центрами зарождения цементитных пластин.

3. Межпластиночное расстояние в перлите определяется расстоянием между плоскополигональными стенками в аустените, сформированными перед превращением его в перлит.

4. Кристаллизация пластинчатого перлита происходит, в первую очередь, за счет торцевого (продольного) роста пластинчатых зародышей цементита, а во вторую очередь, – за счет поперечной кристаллизации пластин цементита и феррита, которая, по всей видимости, протекает по механизму раздельной кристаллизации пластин цементита и феррита за счет переноса углерода от аустенита к цементиту через ферритные пластины в пределах межпластиночного расстояния.

5. При температуре минимальной устойчивости переохлажденного аустенита (500...530 °С) максимальная скорость превращения его в пластинчатый перлит обусловлена минимальным расстоянием между пластинчатыми зародышами цементита, вследствие чего существенно сокращаются пути диффузии углерода при предложенном механизме его превращения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Счастливцев В. М. Перлит в углеродистых сталях / [В. М. Счастливцев, Д. А. Мирзаев, И. Л. Яковлева и др.]. – Екатеринбург. : УрО РАН, 2006. – 311 с.
2. Парусов В. В. Морфологические особенности перлита при превращениях гомогенного аустенита / В. В. Парусов // Сб. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – Днепропетровск: Визин. – 1998. – Вып. 2. – С. 355 – 364.
3. Губенко С. И. Деформация металлических материалов / С. И. Губенко, В. В. Парусов. – Днепропетровск: Арт-пресс, 2006. – 316 с.
4. Парусов Э. В. Влияние режимов охлаждения на превращения аустенита в перлит / Э. В. Парусов, В. В. Парусов, Л. В. Сагура, А. И. Сивак // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. научн. тр. – 2011. – Вып. 58. – С. 527 – 531.
5. Парусов В. В. Влияние скорости достижения температур изотермического превращения аустенита на дисперсность перлита в углеродсодержащих сталях / В. В. Парусов, В. А. Олейник, Ж. А. Борисова, Г. В. Галенко // Сб. Производство и свойства термически обработанного проката: Металлургия. – 1988. – С. 39 – 41.
6. Парусов В. В. Развитие теоретических представлений о перлитном превращении в сталях / В. В. Парусов, Э. В. Парусов, О. В. Парусов, Л. В. Сагура, И. Н. Чуйко, А. И. Сивак // Фундаментальные и прикладные Наукові праці ВНТУ, 2015, № 2

проблемы черной металлургии : Сб. научн. тр. – 2013. – Вып. 27. – С. 200 – 204.

7. Гуляев А. П. Металловедение / А. П. Гуляев. – М. : Металлургия, 1986. – 542 с.

8. Гриднев В. Н. Электронномикроскопическое исследование структуры электроотпущенной стали / В. Н. Гриднев, Ю. Н. Петров // Вопросы физики металлов и металловедения. – 1964. – № 19. – С. 79 – 86.

9. Гриднев В. Н. Перспективы применения скоростной электротермической обработки в производстве стальных канатов / В. Н. Гриднев, Ю. Я. Мешков, Н. Ф. Черненко, Д. И. Никоненко // Стальные канаты. – 1971. – № 8. – С. 292 – 300.

10. Парусов В. В. Разработка высокоэффективных процессов термической обработки мелкосортного проката и катанки и их промышленное освоение: дис. ...доктора тех. наук : 05.16.01 / Парусов Владимир Васильевич. – Д., 1989. – 413 с.

11. Долженков И. И. Исследование механизма и кинетики образования структуры зернистого перлита при термической обработке катанки и проволоки: дис. ...кандидата тех. наук : 05.16.01 / Долженков Игорь Иванович. – Днепропетровск, 1986. – 122 с.

12. Бокштейн Б. С. Диффузия в металлах / Б. С. Бокштейн. – М. : Металлургия, 1978. – 248 с.

13. Бунин К. П. О зарождении и строении перлита / К. П. Бунин, Ю. К. Бунина, В. И. Мазур // МиТОМ. – 1971. – № 10. – С. 6 – 7.

Парусов Эдуард Владимирович – к. т. н., старший научный сотрудник отдела термической обработки металла для машиностроения, +380 56 776 82 28, tometal@ukr.net.

Парусов Владимир Васильевич – д. т. н., проф., заведующий отделом термической обработки металла для машиностроения, +380 56 776 82 28, alyance2000@ukr.net.

Сагура Людмила Владимировна – к. т. н., старший научный сотрудник отдела термической обработки металла для машиностроения, +380 56 776 82 28, 095 5917750, slv_metal@mail.ru.

Чуйко Игорь Николаевич – к. т. н., научный сотрудник отдела термической обработки металла для машиностроения, +380 56 776 82 28, ichuiko@mail.ru.

Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова Национальной академии наук Украины (ИЧМ НАНУ).