

УДК 669.13

Д-р техн. наук Мазур В. И.

Национальный технический университет Украины «КПИ» им. Игоря Сикорского, г. Киев

О КОНТАКТНОМ ПЛАВЛЕНИИ ПРИ ПЕРИТЕКТИЧЕСКОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ СТАЛИ

Цель работы. Исследовать микроскопическую кинетику многоступенчатого перитектического превращения в стали

Методы исследования. Микроскопическую кинетику превращения исследовали с помощью анализа на основе термодинамики необратимых процессов (версия переноса) и диаграммы фазовых равновесий в системе Fe-C.

Полученные результаты. Показано, что действие локальных диффузионных потоков атомов данного компонента (Fe или C) вблизи фазовых границ δ/γ и L/γ противоположны по отношению к устойчивости δ - фазы: после зарождения и роста аустенита на δ - феррите, на границе δ/γ начинается контактное плавление $\delta + \gamma \rightarrow L$. Затем жидкая прослойка затвердевает ($L \rightarrow \gamma$). На новой границе δ/γ контактное плавление с новым слоем δ - феррита повторяется.

Научна новизна. Впервые показано, что перитектическое превращение стали имеет многоступенчатый характер, включающий многократное контактное плавление на границе δ/γ с последующей кристаллизацией аустенита.

Практическая ценность. Найден метод борьбы с образованием перитектических трещин в углеродистых и малолегированных сталях, кристаллизация которых включает перитектическое превращение.

Ключевые слова. Перитектическое превращение, термодинамика, контактное плавление, перитектические трещины.

При перитектическом превращении $\delta + L \rightarrow \gamma$ в Fe-C сплавах кристаллы δ - фазы окружены оболочкой аустенита. Поскольку локальное превращение $\delta \rightarrow \gamma$ с уплотнением упаковки атомов распространяется от поверхности зерна δ - феррита к его центру, в середине зерна образуется пустая полость – рис. 1 [1]. Её поверхность окисляется растворенным кислородом, не заваривается при дальнейшей обработке давлением и при последующей горячей прокатке или ковке возможно хрупкое транскристаллитное разрушение литой заготовки.

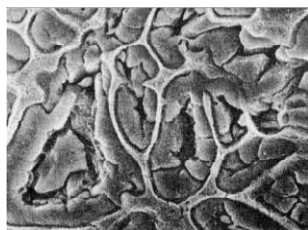


Рис. 1. Перитектические трещины в зернах δ - феррита, сформировавшиеся в ходе быстрого охлаждения при кристаллизации стали $\times 5400$

Исследование микроскопической кинетики перитектического превращения проводили на основе термодинамики необратимых процессов [2] с помощью диаграммы фазовых равновесий в системе Fe-C.

Рассмотрим особенности микроскопической кинетики перитектического превращения при медленном охлаждении Fe-C сплава концентрации I – рис. 2а.

© Мазур В. И., 2018

DOI 10.15588/1607-6885-2018-1-7

ISSN 1607-6885 Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні №1, 2018

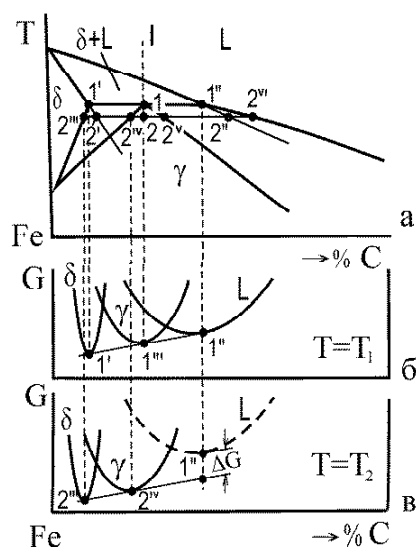


Рис. 2. Перитектический угол диаграммы Fe-C (а) и положение кривых изобарно-изотермных потенциалов при температурах трехфазного равновесия (б) и при перитектическом превращении (в)

При охлаждении сплава из области жидкого состояния до температуры ликвидус наступает двухфазное равновесие $L \leftrightarrow \delta$. При этом выравниваются хим. потенциалы атомов данного компонента в обеих фазах. Кристаллы δ - фазы зарождаются и растут при некотором переохлаждении расплава ниже точки двухфазно-

го равновесия. С понижением температуры их доля увеличивается и при $T = T_1$ согласно с правилом рычага, достигает примерно 50 %

При $T = T_1$ возникает перитектическое равновесие $+ \leftrightarrow -$ – рис. 2б. При этом выравниваются хим. потенциалы атомов данного компонента (Fe или C) во всех трёх фазах – L, δ и γ .

Целесообразно подчеркнуть, что это математическое условие трехфазного равновесия не требует фактического наличия всех трёх равновесных фаз в сплаве.

Согласно основному постулату термодинамики необратимых процессов [2], в первую очередь равновесие наступает в малых объёмах на межфазных границах, а потом распространяется на прилежащие объёмы.

При охлаждении до $T = T_2$ минимум G_L с концентрацией, равновесной для T_2 , становится на ΔG выше общей касательной к таким же кривым для δ и γ - фаз (рис. 2в). Это обуславливает термодинамическую нестабильность жидкой фазы. Она становится пересыщенной углеродом на величину относительно равновесия для T_2 . При критическом пересыщении, определяемом величиной переохлаждения ΔT , зарождается γ - фаза. Она образуется на границе δ/L из-за подкладочного влияния δ - феррита. Это добавляет к существующей межфазной поверхности δ/L еще два типа межфазных границ: L/γ и γ/δ – рис. 3а. Равновесные локальные концентрации этих фаз на межфазных границах определяются с помощью диаграммы фазовых равновесий (рис. 2а, в). Из рис. 3а видно, что на разных межфазных границах данная фаза имеет разную локальную равновесную концентрацию. Градиент $\frac{dc}{dx}$ внутри фазы вызывает локальные диффузионные потоки атомов компонентов, направление которых определяет, будет ли расти или растворяться данная фаза на данной межфазной границе.

Анализ локальных диффузионных потоков показывает (рис. 3б), что на границах L/δ и L/γ диффузион-

ный поток атомов Fe направлен из глубины жидкой фазы к границам с δ - и γ - фазами. Пересыщение жидкости железом на указанных межфазных границах сдвигает фигуративную точку влево на коноде $2^I 2^{VI}$, что согласно с правилом рычага приводит к увеличению объёмной доли как аустенита (конода $2^V 2^{VI}$), так и γ - феррита (конода $2^I 2^{II}$).

К границе γ/δ из глубины этих фаз направлен диффузионный поток атомов C. Повышение концентрации углерода в приграничных участках этих фаз сдвигает фигуративную точку вправо, а именно, для δ - фазы – правее точки 2^I , для γ - фазы – правее точки 2^V , что указывает на переход в двухфазное состояние с участием жидкой фазы. Таким образом на межфазной границе γ/δ происходит локальное контактное плавление обеих твердых фаз. Поскольку контактное плавление аустенита начинается сразу после его зарождения на δ - феррите, жидкофазная прослойка на границе γ/δ постоянно сообщается с первичной жидкой фазой, которая осталась между ветвями δ - дендритов – рис. 3в. Эта интересная особенность микроструктуры имеет важное технологическое значение: она позволяет компенсировать жидкостью усадку при полиморфном превращении δ - фазы в более плотноупакованную γ - фазу.

Появление жидкофазной прослойки на границе с δ - ферритом раньше объясняли как следствие расклинивающего воздействия жидкости на межфазной δ/γ границе (эффект Ребиндера) [1] или как влияние примесных или легирующих элементов [3], но о контактном плавлении на этой границе ничего не было известно.

Благодаря локальному обогащению железом жидкой фазы в прослойке до концентрации правее точки 2^I на поверхности оплавленного δ - феррита как на подкладке зарождается новый слой аустенита. Обогащение углеродом обеих твердых фаз на границе δ/γ снова вызывает локальное контактное плавление и процесс воспроизводится. В результате вокруг кристалла

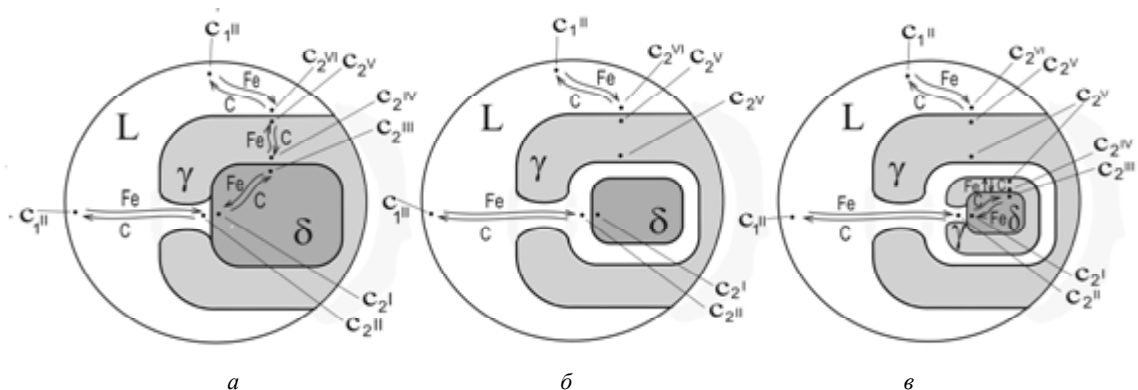


Рис. 3. Микроскопическая кинетика перитектической реакции, включающая зарождение и рост аустенита на поверхности δ - феррита (а), контактное плавление на границе δ/γ (б) и последующее образование нового слоя γ - фазы (в)

δ - феррита образуются концентрические слои аустенита, разделенные прослойками жидкости (рис. 2в). Они сообщаются с первичной междендритной жидкостью и обеспечивают ее подкачку в зоны превращения $\delta \rightarrow \gamma$. Этим обеспечивается отсутствие усадочных перитектических трещин.

Изложенный теоретический анализ микроскопической кинетики перитектического превращения подтверждается экспериментом. На рис. 4 [3] показано сечение дендритной ветви δ - феррита, окруженной первичной междендритной жидкостью $L_{мд}$. В результате перитектического превращения образовались три концентрических слоя аустенита (стрелки γ), разделенных жидкими прослойками (стрелки $L_{кп}$) – продуктами локального контактного плавления на границе δ/γ .

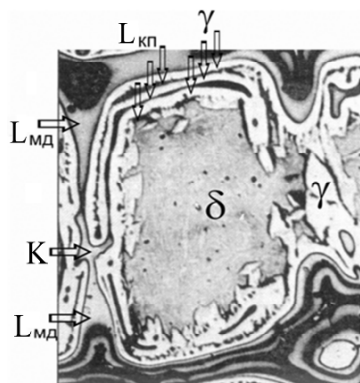


Рис. 4. Начало перитектического превращения в стали.

Сечение ветви дендрита δ - феррита. Слои аустенита (γ) с жидкими прослойками ($L_{кп}$) соединены каналом К с междендритной жидкостью $L_{мд}$. Внутри дендритной ветви виден участок непревращенного δ - феррита (сравнить с рис. 3в) $\times 400$

Они сообщаются с первичной междендритной жидкостью $L_{мд}$ каналом К. В центральной зоне непревращенного δ - феррита заметны немногочисленные поры – результат коалесценции вакансий, образовавшихся в ходе релаксации растягивающих напряжений в δ - феррите, вызванных полиморфным $\delta \rightarrow \gamma$ превращением. Вместе с тем усадочные раковины полностью отсутствуют. Это свидетельствует об эффективности бор-

бы с усадочными раковинами путем стимулирования локального контактного плавления на межфазной δ/γ границе и подкачки первичной жидкости в реакционную зону.

Поскольку контактное плавление на границе δ/γ реализуется как результат диффузии атомов углерода в твердых фазах, скорость которой значительно ниже, чем в жидкой фазе, то приведенный механизм микроскопической кинетики перитектического превращения может быть реализован в промышленных условиях только при медленном охлаждении при температуре (или в интервале температур) перитектического превращения. Скоростной режим должен быть подобран экспериментально для конкретной марки стали и массы плавки.

Выводы

1. При быстром охлаждении сталей с перитектическим механизмом кристаллизации внутри каждого зерна δ - феррита образуются усадочные перитектические трещины.

2. Впервые установлено, что при медленном охлаждении перитектическое превращение можно охарактеризовать как многоступенчатый процесс. Наряду с ростом δ и γ кристаллов на границе с жидкой фазой, обнаружен циклически повторяющийся процесс локального контактного плавления на границе δ/γ с последующим зарождением нового слоя γ - фазы на оплавленной поверхности δ - феррита.

3. Образовавшиеся слои жидкой фазы сообщаются с остаточной междендритной жидкостью и обеспечивают ее подкачку в зоны превращения $\delta \rightarrow \gamma$, что предотвращает образование перитектических трещин.

Список литературы

1. Калинушкин Е. П. Перитектическая кристаллизация легированных сплавов на основе железа / Е. П. Калинушкин. – Дн-ск : Пороги, 2007. – 172 с.
2. Базаров И. П. Термодинамика / И. П. Базаров. – 2-е изд. перераб. – М. : Высшая школа. 1976. – 447 с.
3. Кристаллизация и первичная структура конструкционных сталей / А. И. Яценко, В. Е. Хрычиков, Т. С. Хохлова и др. – Дн-ск : Журфонд, 2010. – 226 с.

Одержано 10.09.2018

Мазур В.І. Про контактне плавлення при перитектичній кристалізації сталі

Ціль роботи. Дослідити мікроскопічну кінетику перитектичного перетворення в сталі.

Методи досліджень. На основі термодинаміки незворотних процесів (версія перенесення) та діаграми фазових рівноваг в системі Fe-C відпрацьовано методику аналізу мікроскопічної кінетики перитектичного перетворення в сталі.

Отримані результати. Показано, що дія локальних дифузійних потоків атомів цього компоненту (Fe або C) поблизу фазових границь δ/γ і L/γ протилежні відносно стабільності δ - фази: після зародження і росту аустеніту на δ - фериті на границі δ/γ починається контактне плавлення: $\delta + \gamma \rightarrow L$. Після цього рідкий прошарок твердіє ($L \rightarrow \gamma$), утворюється нова границя δ/γ і процес контактного плавлення повторюється з новим шаром δ - фериту.

Наукова новизна. Вперше показано, що перитектичне перетворення сталі має багатоступеневий характер, що містить багаторазове контактне плавлення на границі δ/γ з наступною кристалізацією аустеніту.

Практична цінність. Знайдено метод боротьби з утворенням перитектичних тріщин у вуглецевих та малолегованих сталях, кристалізація яких містить перитектичне перетворення.

Ключові слова. Перитектичне перетворення, термодинаміка, контактне плавлення, перитектичні тріщини.

Mazur V. On the contact melting during peritectic steel solidification

Purpose. To investigate the microscopic kinetics of peritectic transformation in a steel.

Methods of research. The microscopic kinetics of peritectic transformation in steel has been studied with the help of analyze developed on the base of the thermodynamics of irreversible processes (transfer version) and Fe-C phase diagram.

Results. It is shown that the effect of the local diffusion fluxes of atoms of given component (Fe or C) near the phase borders δ/γ and L/γ are opposite with respect to the δ -phase stability. After nucleation and growth of austenite on δ -ferrite, contact melting $\delta + \gamma \rightarrow L$ begins near the δ/γ boundary. After this, the liquid layer solidifies $L \rightarrow \gamma$, new δ/γ boundary is formed and the process is repeated with a new layer of the δ -ferrite.

Scientific novelty. For the first time it has been shown that the peritectic transformation in the steel has a multistage character. It includes multiple contact melting on the border δ/γ , followed by γ -phase crystallization.

Practical value. A method to prevent the formation of peritectic cracks in the low carbon and low alloyed steels undergoing peritectic transformation is proposed.

Key words. Peritectic transformation, thermodynamics, contact melting, peritectic cracks.
