

# ФОРМИРОВАНИЕ В ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ОБЛАСТИ СТРУКТУР ЗЕРНИСТОЙ МОРФОЛОГИИ И НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ТЕРМИНОЛОГИИ

Свищенко В.В., Чепрасов Д.П., Иванайский А.А.

При изотермическом распаде аустенита стали 20Х2Н4С в диапазоне температур 550 – 450°С формируется своеобразная структура зернистой морфологии, на фоне которой наблюдаются игольчатые структуры. Из имеющихся зарубежных и отечественных публикаций следует, что структуры зернистой морфологии могут формироваться в верхней части промежуточной области низкоуглеродистых малолегированных сталей. Авторы публикаций при обозначении зернистых структур, сформировавшихся в промежуточной области, используют термины - «зернистый бейнит» [1, 2], «бейнит без видимых выделений карбидной фазы» [3], «овражный бейнит» [4] и др. Строение и механизм образования данных структур изучены недостаточно.

Для уточнения строения и механизма образования промежуточных структур низкоуглеродистых малолегированных сталей была построена диаграмма изотермического распада стали 20Х2Н4С и проведена ступенчато-изотермическая закалка образцов, фиксирующая структуру после определённого времени распада  $\gamma$ -фазы в промежуточной области. Дилатометрические исследования и построение диаграммы изотермического распада аустенита выполнены под руководством М.Ф. Евсюкова в Институте черной металлургии Министерства чёрной металлургии СССР (г. Днепропетровск) по методике, изложенной в [5]. Результаты оформлены официальным заключением ИЧМ от 13.11.1989г.

Ступенчато-изотермическая закалка заключалась в следующем. Образцы из соляной ванне с температурой 880 °С быстро перенесли в свинцовую ванну имеющую температуру в интервале 550 - 400 °С. После изотермического распада части аустенита в промежуточной области образцы охлаждались в воде.

Наличие остаточного аустенита определяли рентгеноструктурным анализом на дифрактометре «ДРОН- 2,0» (порог чувствительности 3-5 %). Исследования микроструктуры выполняли на металлографическом микроскопе «NEOFOT-32» и электронном микроскопе УЭМВ-100К.

Исследование образцов, использованных при построении диаграммы изотермического превращения, показало, что в промежуточном интервале наблюдается повышенная

устойчивость переохлаждённого аустенита. При температурах ниже 600°С в процессе изотермической выдержки (около 2 часов) часть аустенита сохраняется и при последующем охлаждении превращается в мартенсит. С увеличением температуры изотермической выдержки количество аустенита нераспавшегося в промежуточном интервале увеличивается. Изотермические выдержки при 550-450°С приводят к образованию зернистых структур, не содержащих остаточного аустенита.

Для уточнения механизма формирования зернистых структур была проведена ступенчато-изотермическая закалка, позволившая наглядно, по стадиям проследить последовательность и кинетику формирования продуктов распада аустенита. Наличие остаточного аустенита в образцах после ступенчато-изотермической закалки не выявлено. Превращение при 550°С начинается с появления добейнитной  $\alpha$ -фазы названной мезоферритом (объяснение терминологии изложено ниже). Мезоферрит образуется преимущественно по границам аустенитных зерен, где зарождение центров новой фазы облегчено. Через 20 секунд изотермической выдержки общее количество продуктов распада аустенита достигает 50-60 %. В некоторых редких участках начинает просматриваться карбидная фаза в виде отдельных или чередующихся пластин-игл. Последние более отчетливо видны после травления щелочным раствором пикрата натрия. Эти участки механической смеси  $\alpha$ -фазы и пластинчатых карбидов следует считать верхним бейнитом, однако в рассматриваемой структуре его еще мало. Основная часть структуры состоит из мезоферрита, образовавшегося в результате  $\gamma$  -  $\alpha$  превращения, в процессе которого карбиды не выделялись, а углерод диффузионно перераспределялся от фронта фазовой перекристаллизации в непревращенный аустенит. Зерна мезоферрита в основном имеют полиэдрическую форму и различаются размерами в зависимости от времени образования. Они в одних участках примыкают друг к другу, в других выглядят как островковые включения окруженные мартенситом, образовавшимся в процессе охлаждения. Следующие 40 секунд превращение идёт со значительно меньшей скоростью, что связано с увеличением концентрации углерода в не-

превращенном аустените и повышением его устойчивости. За этот отрезок времени распалось ещё примерно 20 % аустенита, превратившись в основном в верхний бейнит. Электронная микроскопия не выявила наличия глобулярных карбидов характерных для зернистого бейнита. Появились признаки отпуски мезоферрита, образовавшегося на начальных стадиях распада. Он стал склонен к растравливанию с плохо выявляемыми границами зерен. Дальнейшие выдержки, незначительно увеличивая количество изотермически распавшегося аустенита, приводят к развитию отпускных процессов. В результате появляются мелкодисперсные глобулярные карбиды, придающие структуре более однородный зернистый вид. Однако такая структура уже не является непосредственным продуктом распада аустенита.

Образование мезоферрита наблюдается и при более низких температурах изотермического превращения, вплоть до температуры 450°C. Количество аустенита, претерпевшего бескарбидный этап распада, с понижением температуры от 500 до 450°C резко уменьшается, вследствие снижения диффузионной подвижности углерода. Количество верхнего бейнита в структуре соответственно растёт. Продукты превращения становятся дисперснее.

При температуре изотермической выдержки 400°C распад аустенита начинается непосредственно с образования игольчатой механической смеси  $\alpha$ -фазы и карбидов идентифицированной как нижний бейнит.

Для обсуждения полученных результатов необходимо определиться с терминологией, которая в ряде публикаций и даже в учебниках трактуется по-разному.

Э. Давенпорт и Э. Бейн в 1930г. показали существование промежуточного превращения в эвтектоидной стали, продуктом которого являлся игольчатый тростит. Позднее у термина «промежуточное превращение» появился синоним - «бейнитное превращение», а структуру игольчатого троостита стали называть бейнитом. В процессе образования игольчатого троостита (бейнита) происходит бездиффузионное  $\gamma$  -  $\alpha$  превращение и образование карбидов. Многие металловеды [6-8] называют образовавшуюся  $\alpha$ -фазу ферритом, оговаривая, что ферритная фаза в бейните является пересыщенным твёрдым раствором углерода в  $\alpha$ -железе. При такой терминологии может возникнуть путаница с обычным ферритом и имеется противоречие с трактовкой мартенсита. Видимо, поэтому часть металловедов [2, 9-11] не пользуются термином «феррит» применительно к  $\alpha$ -фазе бейнита. Так в учебнике [9] для обозначения  $\alpha$ -фазы бейнита используется термин  $\alpha$ -

твёрдый раствор, который называют мартенситом (малоуглеродистым мартенситом). Эта терминология точнее, поскольку образующаяся при бейнитном превращении  $\alpha$ -фаза имеет мартенситную природу, однако, здесь возможна путаница с обычным мартенситом, образующимся в мартенситной области. В учебнике [2] и справочнике [11] используется только однозначный термин - «бейнитная  $\alpha$ -фаза» или просто  $\alpha$ -фаза без привязывания к нему известных терминов. Мы для обозначения  $\alpha$ -фазы, входящей в состав бейнита, будем использовать эту терминологию.

Есть вопросы и по терминологии, связанной с фазовым составом и структурой бейнита. Изначально бейнитом (игольчатым трооститом) являлась механическая смесь  $\alpha$ -фазы и карбидов. Позднее было установлено [6, 7], что в процессе промежуточного превращения аустенит начинает распадаться на механическую смесь  $\alpha$ -фазы и карбидов только после достижения им определённой концентрации углерода. Показано, что в низкоуглеродистых сталях при распаде аустенита в верхней части промежуточной области, образованию смеси  $\alpha$ -фазы и карбидов предшествует образование по промежуточному механизму избыточной  $\alpha$ -фазы. В монографии [6] эту избыточную  $\alpha$ -фазу называют добейнитным ферритом. По мнению авторов [6, 7] конечная структура в этом случае после завершения промежуточного превращения состоит из добейнитной  $\alpha$ -фазы и бейнита. Авторы исходят из того, что бейнит это в обязательном порядке механическая смесь  $\alpha$ -фазы и карбидов. Однако в учебнике [8] показано, что есть стали, у которых в процессе промежуточного превращения карбиды вообще могут не выделяться, а конечная структура состоит из  $\alpha$ -фазы и остаточного аустенита. В этом учебнике такую структуру называют бейнитом. Аналогичную структуру в работе [3] обозначили термином «бейнит без выделений карбидной фазы». В своих предыдущих публикациях [12-14] мы также понимали под «бейнитом» совокупность структур, образовавшихся в результате промежуточного превращения. Теперь в терминологии исходим из того, что бейнит - это в обязательном порядке механическая смесь  $\alpha$ -фазы и карбидов. Мы пришли к выводу, что расширенное толкование «бейнита» содержит противоречие. Если называть бейнитом промежуточную структуру состоящую например из добейнитной  $\alpha$ -фазы и механической смеси бейнитной  $\alpha$ -фазы и карбидов, то последней структурной составляющей нужно менять уже имеющееся собственные название. Это нецелесообразно, так как для механической смеси бейнитной  $\alpha$ -фазы и карбидов название «бейнит» является устоявшимся-

## ФОРМИРОВАНИЕ В ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ОБЛАСТИ СТРУКТУР ЗЕРНИСТОЙ МОРФОЛОГИИ И НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ТЕРМИНОЛОГИИ

ся. Аналогичная проблема терминологии возникает и в случае если в процессе промежуточного превращения образуется структура состоящая из бейнитной  $\alpha$ -фаза и остаточного аустенита. Каждую из описанных в примерах структуру, по-видимому, следует называть не бейнитом, а общим названием - промежуточная структура, указывая затем её структурные составляющие.

По особенностям микроструктуры большинство металловедов подразделяют бейнит только на верхний и нижний. Однако в монографии [1] и учебнике [2], указывается, что в низкоуглеродистых легированных сталях могут образовываться бейниты зернистой морфологии (зернистые бейниты). Чётких критериев зернистого бейнита не приводится. Анализ микроструктур приведённых в монографии [1] и называемых зернистым бейнитом показывает, что во многих случаях глобулярный характер общей структуре придаёт избыточная  $\alpha$ -фаза и островковые включения остаточного аустенита. Такую структуру, по основаниям, изложенным выше, не следует обозначать термином бейнит, поскольку он присутствует в ней лишь как одна из структурных составляющих. В этом случае следует говорить о зернистой промежуточной структуре, а не о бейните в целом.

По аналогии с зернистым перлитом мы будем считать бейнит зернистым, если входящая в состав бейнита карбидная фаза имеет зернистую (глобулярную) форму, а вторая составляющая бейнита ( $\alpha$ -фаза) относительно равноосна. Бейнит такой морфологии был обнаружен в структуре стали 20X2H4ч, сформировавшейся в условиях непрерывного охлаждения при начале распада аустенита в верхней части промежуточной области [12-14].

Как показали результаты настоящего исследования, промежуточное превращение в интервале температур 550 - 450 °С начинается с образования однофазной структуры. Она не может быть доэвтектоидным ферритом, образующимся в интервале температур перлитного превращения, хоть и похожа на него по морфологии. Эта структура может быть только добейнитной  $\alpha$ -фазой. Она пересыщена углеродом, о чём свидетельствует выделение карбидов самоотпуска. Кроме того, анализ диаграмм изотермического распада аустенита (по литературным данным) показывает, что нижняя температурная граница образования доэвтектоидного феррита у углеродистых сталей составляет примерно 550°С. Легирование стали хромом повышает температуру рекристаллизации железа [11], а, следовательно, повышает нижнюю температурную границу области диффузионного образования феррита. Распад легированного хромом аустенита при температуре 550 °С (а

ПОЛЗУНОВСКИЙ АЛЬМАНАХ №4 2003

при 500 и 450 °С тем более) должен происходить в промежуточном интервале, что подтверждается и диаграммой изотермического распада аустенита стали 20X2H4ч. Однако на приведённой диаграмме (как и на других подобных) в промежуточном интервале температур нет отдельной области образования добейнитной  $\alpha$ -фазы, а есть только бейнитная область. Отсутствие области образования добейнитной  $\alpha$ -фазы не согласуется не только с результатами настоящего исследования, но и с имеющимися литературными данными об образовании добейнитной  $\alpha$ -фазы. Во втором томе монографии [1] под номером 396/8 приведена микроструктура молибденовой стали после следующей термической обработки: аустенизация - 860°С; изотермическая выдержка при 550 °С, 100 секунд; закалка в воду. Микроструктура, обозначенная авторами как бейнитный феррит + мартенсит, аналогична микроструктуре получаемой в стали 20X2H4ч в таких же условиях и обозначенной нами как мезоферрит + мартенсит. Как уже отмечалось, на выделение при определённых условиях добейнитной  $\alpha$ -фазы также указывается в работах [6, 7]. Следовательно, и на диаграмме распада аустенита соответствующая область в промежуточном интервале должна существовать. Её отсутствие может быть связано с тем, что применяемая для построения диаграмм аппаратура возможно ещё не достаточно чувствительна, в результате область образования добейнитной  $\alpha$ -фазы и бейнитная область определяется как одна область.

Таким образом вполне очевидно, что однофазная структура, образующаяся на начальном этапе превращения в интервале температур 550-450°С, является добейнитной  $\alpha$ -фазой. По рекомендации главного редактора журнала МиТОМ профессора Прусаков Б.А. сочли целесообразным наименовать эту структуру собственным именем – «мезоферрит» (имея ввиду, что в отличие от доэвтектоидного феррита мезоферрит образуется в диапазоне температур между «перлитным» носиком диаграммы превращений и линией Mn ).

Мезоферрит интенсивно образуется на начальном этапе превращения, который условно можно считать бескарбидным. Условно потому, что добейнитная  $\alpha$ -фаза пересыщена углеродом и из неё после образования вследствие самоотпуска выделяются карбиды.

Наличие значительного количества зернистой добейнитной  $\alpha$ -фазы (мезоферрита) обуславливает глобулярный характер структурам, формирующимся при изотермическом распаде аустенита в верхней части промежуточной области. Внешне они похожи на зер-

нистые промежуточные структуры, получаемые в стали 20Х2НАч в условиях непрерывного охлаждения, но в действительности отличается от них фазовым составом и морфологией. Это обусловлено кинетическими особенностями изотермического превращения. Как показано в работах [12-14] и настоящим исследованием зернистые промежуточные структуры, получаемые как непрерывным охлаждением, так и изотермически на начальном этапе превращения формируются по одинаковому механизму - образование кристаллов добейнитной  $\alpha$ -фазы и их быстрый рост за счет отвода углерода от фронта перекристаллизации в непревращенный аустенит. При непрерывном охлаждении интенсивность образования избыточной  $\alpha$ -фазы на начальном этапе превращения настолько высока, что нераспавшейся аустенит по истечении короткого времени оказывается окруженным мезоферритом и приобретает вид островковых включений [12, 13]. На следующем этапе превращения часть заблокированного обогащенного углеродом аустенита распадается на механическую смесь  $\alpha$ -фазы и глобулярных карбидов (зернистый бейнит), часть превращается в мартенсит, а часть (6-10 %) из за высокой концентрации углерода так и остается непревращенным. При изотермическом распаде скорость превращения уже на начальном этапе значительно ниже, что обусловлено меньшим числом центров перекристаллизации. Несмотря на быстрый рост образовавшихся кристаллов мезоферрита, общего его количества оказывается недостаточно для окружения непревращенного аустенита, наоборот, во многих участках сама добейнитная  $\alpha$ -фаза остается им заблокирована. Обогащение аустенита углеродом происходит в значительно меньшей степени. После относительно интенсивного начального бескарбидного этапа следует "вялый" карбидный, в процессе которого образование  $\alpha$ -фазы чередуется с образованием карбидов. На этом этапе часть аустенита превращается в верхний бейнит. Оставшаяся часть при охлаждении превращается в мартенсит.

#### Выводы

При температурах изотермической выдержки 550-450 °С начальный этап промежуточного превращения аустенита стали 20Х2НАч является бескарбидным. Превращение начинается с образования зернистой добейнитной  $\alpha$ -фазы (мезоферрита). С течением

времени бескарбидный этап сменяется распадом аустенита на верхний бейнит. Часть аустенита в процессе изотермической выдержки сохраняется и при последующем охлаждении превращается в мартенсит. Мезоферрита тем больше, чем выше температура превращения. Наличие мезоферрита придает конечной структуре зернистый характер.

#### Список литературы

1. Металлпрография железа: В 3-х т. Пер. с англ. / Под ред. Ф.Н. Тавадзе. М.: Металлургия, 1972. Т.1, 2. 246 с.
2. Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г. Специальные стали. М.: Металлургия, 1985. 408 с.
3. Малышевский В.А., Семичева Т.Г., Хлусова Е.И. Влияние легирующих элементов и структуры на свойства низкоуглеродистой улучшаемой стали // МиТОМ. 2001, №9. С. 5-9.
4. Теплухин Г.Н. Условия, механизм образования и морфология бейнитных структур // Изв. РАН Металлы. 1994. №6. С. 98-104.
5. Евсюков М.Ф., Притоманова М.И. – Металлофизика. Киев: Наукова думка, 1976, вып. 64, с. 77-81.
6. Гудремон Э. Специальные стали. В 2-х т. Пер. с нем. М.: Металлургия, 1966. Т. 1. 736 с.
7. Блантер М.Е. Теория термической обработки. М.: Металлургия, 1984. 328с.
8. Новиков И.И. Теория термической обработки. М.: Металлургия, 1986. 480с.
9. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение. М.: Машиностроение, 1990. 528 с.
10. Гуляев А.П. Металловедение. М.: Металлургия, 1986. 442 с.
11. Металловедение и термическая обработка стали: Справочник. В 3-х т. М.: Металлургия, 1983. Т.2. 368 с.
12. Свищенко В.В. Строение и механизм формирования зернистого бейнита // Труды Алтайского Государственного Технического Университета им. И.И. Ползунова - Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 1995. - С. 44-50
13. Кремнев Л.С., Свищенко В.В., Чепрасов Д.П. Строение и механизм формирования зернистого бейнита в стали 20Х2НАч // МиТОМ. 1997. №9. С.6-9.
14. Кремнев Л.С., Свищенко В.В., Чепрасов Д.П. Скоростной диапазон образования зернистого бейнита при распаде аустенита стали 20Х2НАч // МиТОМ. 1998. № 5. С. 17-19.