

## ЧУГУН КАК ЛИТЕЙНЫЙ МАТЕРИАЛ

При подготовке настоящего обзора использован электронный курс «Материаловедение» Третьяковой Н.В., к.т.н., доц. каф. технологий автоматизированного машиностроения Ивановского государственного энергетического университета

Редакция благодарит Марата Канафина (ООО «НПП «Технология», г. Челябинск) за любезное согласие отрецензировать материал

### ◆ ...Это просто сплав железа с углеродом

И чугун, и сталь — соединения железа (Fe) с углеродом (C). Формальное отличие только в том, что в стали меньше 2,14% углерода, а в чугуне — больше 2,14% (и до 6,67%). Правда, количество в данном случае переходит в качество, порождая совсем другие технологические свойства. Внутренняя структура материала принципиально изменяется.

Для того чтобы понять суть этих отличий, нам придется немного углубиться в металловедение, разобравшись в значении нескольких звучных и красивых терминов. Заодно мы увидим, что самые главные процессы происходят не в вагранках и дуговых печах, но в самих отливках, во время их остывания. (Ну а в первую очередь, естественно, важен состав *шихты*<sup>1</sup>.)

Хорошо известно, что углерод может находиться в двух *модификациях*. Банальный графит из карандаша и драгоценный алмаз из перстня отличаются только видом кристаллической решетки углерода. Способность атомов химического элемента образовывать разные кристаллы с разными свойствами называется *аллотропией*.

Но и железо тоже аллотропично, только не в зависимости от давления, как углерод, а в зависимости от температуры. Правда, чистое железо на практике не встречается, поэтому его модификации просто обозначили греческими буквами<sup>2</sup>. А в сплавах железа с углеродом разнообразие фазовых состояний ещё больше. Ведь углерод там одновременно находится в виде твердого раствора с железом, в виде химического соединения, да еще и в

свободном состоянии в виде графита (в серых чугунах).

Начнем с химического соединения — *цементита*. Нужно понимать, что это не железо, не углерод и не их смесь — это новое вещество. (Так, поваренная соль — вовсе не смесь хлора с натрием!) Его формула —  $Fe_3C$ . Легко посчитать<sup>3</sup>, что углерода по весу в цементите — 1/15, или 6,67%. То есть, выходит, «сплав железа с углеродом» — это не два вещества, а три!<sup>4</sup>

Что же касается растворов (твердых!) углерода в железе, то их не сколько — в зависимости от кристаллической решетки железа — его, железа, модификации. В самое «холодное» железо, где атомы в кристалле наиболее плотно расположены, помещается мало углерода — не более 0,02%<sup>5</sup>. Углерод «влезает» в дефекты решетки. Этот раствор называют *ферритом*. В «температурно-среднем» железе углерода может раствориться больше — до 2,14% (знакомые цифры?) — получается аустенит. Ну а третья модификация железа — вещь настолько экзотичная, что, «забыв» про нее, мы почти ничего при этом не потеряем.

### ◆ Эврика! Эвтектика!

Теперь мы подошли к самому сложному — к понятию *эвтектики*. Понятие это связано вот именно с кристаллизацией *сплавов*. Для начала вспомним, как замерзает (кристаллизуется) вода. Какова самая низкая температура воды? Ноль! А самая высокая — льда? Ноль! Вся кристаллизация<sup>6</sup> происходит при одной и той же температуре! Так уж устроен мир, что количество энергии, которое выделяется при кристаллизации, как раз та-

ково, чтобы сохранять температуру постоянной. Более того, эта температура — строго определенная для каждого фазового перехода.

Но если кристаллизуется не чистое вещество, а сплав (раствор) — картина меняется, усложняется. Вспомните, зачем зимой дороги посыпают солью? А что будет, если сначала в горячей воде растворить много соли, а потом ее охладить? Так вот — внимание! — для каждого сплава/раствора существует совершенно четкое — *эвтектическое* — соотношение содержаний входящих в него веществ, при котором они кристаллизуются «в едином порыве»: вместе и при одной температуре. Если какого-то вещества больше «нормы», то оно кристаллизуется раньше собрата по сплаву. Жидкий сплав при этом как бы «сбрасывает» излишки одной из своих составляющих, покада состав оставшейся жидкости не станет *эвтектическим*. И тогда — вновь идет *эвтектическая* кристаллизация.

Когда одно из веществ в сплаве «играет на опережение» — энергии его кристаллизации не хватает, чтобы поддерживать температуру постоянной, и она падает, хотя и медленнее. Лишь кристаллизуясь вместе, сплавленные вещества поддерживают температуру: кристаллизация эвтектики имеет свой постоянный «ноль градусов». Для сплава железа (в модификации аустенита) и цементита этот «ноль» находится на уровне 1147° С, а «правильное» содержание углерода — 4,3%.

В результате «совместной» кристаллизации получается равномерная и очень мелкодисперсная смесь разнородных кристаллов, которая, собственно, и называется *эвтектикой*. Эвтектика системы «железо-цементит» носит название *ледебурит*, в честь немецкого ученого Ледебура.

На практике абсолютно точно «попасть» в нужное соотношение содержаний невозможно. Фактически то, что получается в результате кристаллизации, является крупнодисперсной смесью эвтектики с микрокристаллами

<sup>1</sup> Шихта — то, что закладывается в печь, где совместно переплавляется: стальной или чугунный лом, литейный или перелитый чугун, ферросплавы.

<sup>2</sup> Бывают три кристаллических («твердых») железа: альфа-железо — до 911° С, гамма-железо — от 911° С до 1392° С, и высокотемпературное железо — от 1392° С до 1539° С, а при более высокой температуре железо — жидкое.

<sup>3</sup> Атомный вес железа — 56, углерода — 12, цементита —  $56 \times 3 + 12 = 180$ ; и теперь  $12/180 = 1/15$

<sup>4</sup> На самом деле все втроем они встречаются только в сером чугуне, см. ниже.

<sup>5</sup> А при комнатной температуре — и во все не более 0,006%.

<sup>6</sup> Здесь и далее во всех рассуждениях имеется в виду «при атмосферном давлении».

«лишнего» вещества. В нашем случае — ледебурит с цементитом, или ледебурит с аустенитом (железом).

Итак, 1147° С прошли, затвердели, охлаждаемся дальше. И тут оказывается, что аустенит до комнатной температуры «не доживет». И сам по себе, и в твердом сплаве с цементитом. Нас ждет еще одно аллотропическое превращение, соответствующее переходу аустенит-феррит, как бы «рекристаллизация». И у этого превращения есть свои параметры, подобные эвтектическим: постоянная температура 727° С, содержание углерода 0,8%. А смесь, образуемая в результате — это *перлит*, названный так потому, что, отшлифованный, блестит как перламутр. Вот он, последний «сожитель» коммуналки под названием «сплав Fe и С».

Итак, если рассмотреть «сплав железа с углеродом» под микроскопом, мы увидим набор следующих образований:

вещества: цементит и графит;  
растворы: феррит и — при температурах более 727° С — аустенит;  
мелкодисперсные смеси: перлит и ледебурит.

А от того, какова микроструктура сплава — зависят его свойства.

### ◆ Так что же такое «чугун»

Кое-что мы в предыдущем разделе упростили — и потеряли очень важный нюанс. И даже не нюанс, а половину сути. Дело в том, что в сплаве идут не только фазовые превращения, но и химические реакции. Это всё цементит (который ведь Fe<sub>3</sub>C) — то образуется, то распадается.

Образуется цементит (его называют «вторичный», «третичный») потому, что максимальная растворимость углерода в железе падает с понижением температуры. В аустените, допустим, лишь при 1147° С можно растворить 2,14% графита, а при 727° С — только 0,8%. Нужно же куда-то «лишнему» углероду деться? Вот он и вступает в *химическую* реакцию с железом. Ну а, распавшись, цементит, естественно, выделяет углерод в виде графита. Графит может также образовываться из аустенита и даже сразу из жидкой фазы при очень медленном охлаждении и наличии центров кристаллизации<sup>7</sup>. Можно и специально выделять графит, выдерживая отливки при температуре

<sup>7</sup> Например, добавляя кремний (Si), «похожий» на углерод, мы получим центр кристаллизации графита, но при этом кремний в цементит не свяжется.

больше 737° С<sup>8</sup>. Этот важный процесс во всех его разновидностях называется *графитизацией*.

Так вот, когда говорят, что, мол, чугун отличается от стали тем, что в нем есть свободный графит — это не совсем верно! Точное определение таково: «**Чугунами** называют сплавы железа с углеродом, которые содержат углерода более 2,14%, и потому заканчивают кристаллизацию образованием эвтектики (ледебурита).» Если же углерода менее 2,14%, ненасыщенный углеродом аустенит кристаллизуется при более высокой температуре, нежели эвтектические 1147 градусов, подобно тому как чистая вода кристаллизуется при более высокой температуре, нежели соленая.

Далее, в зависимости от содержания углерода в чугуне различают:

- белый чугун — углерод в связанном состоянии в виде цементита, в изломе имеет белый цвет и металлический блеск;

- серый чугун — большая часть углерода находится в свободном состоянии в виде графита, а в связанном состоянии находится не более 0,8% углерода. Из-за большого количества графита его излом имеет серый цвет;

- половинчатый — часть углерода находится в свободном состоянии в форме графита, но не менее 2% углерода находится в форме цементита. Мало используется в технике.

### ◆ Графит

Следует признать, что с практической точки зрения раскритикованное выше заявление не так уж далеко от истины. Ведь белый чугун как таковой используется нечасто. Основные технологические свойства чугунов отливок, выгодно (так же как и невыгодно) отличающие их от стальных заготовок, как раз и происходят от наличия свободного графита.

Графитовые включения можно рассматривать как соответствующей формы пустоты, дефекты в структуре сплава. Около таких дефектов при нагружении детали концентрируются напряжения, значение которых тем больше, чем острее дефект. Значит, сильнее всего «портят» металл графитовые включения пластинчатой формы. Бо-

<sup>8</sup> 738° С — это эвтектическая температура твердого сплава железо-графит. Мы же предупреждали, что у нас три вещества. Значит, и систем (как-бы сплавов) может быть три. Но вот систему графит-цементит рассматривать не принято — смысла нет, поскольку там все же значительно больше железа...

лее благоприятна хлопьевидная форма, а оптимальной является шаровидная форма графита. Но коли свободный графит так вреден для прочности, зачем же он нужен в сплаве? Просто в определенных случаях недостатки чугуна компенсируются достоинствами:

- графит упрощает мехобработку, так как образуется ломкая стружка;

- чугун имеет лучшие антифрикционные свойства, по сравнению со сталью, так как наличие графита обеспечивает дополнительную смазку поверхностей трения;

- из-за микропустот, заполненных графитом, чугун хорошо гасит вибрации и имеет повышенную циклическую вязкость;

- чугун обладает значительно более высокой жидкотекучестью, из него проще лить детали сложных форм;

- детали из чугуна не чувствительны к внешним концентраторам напряжений (выточки, отверстия, переходы в сечениях);

- наконец, чугун дешевле стали.

Наиболее широкое распространение получили чугуны с содержанием углерода 2,4—3,8%. Но кроме углерода в чугунах, как и в сталях, имеются легирующие — введенные специально, а также естественные или случайные добавки других элементов.

Углерод и кремний способствуют графитизации, марганец ее затрудняет и способствует отбеливанию чугуна. Сера способствует отбеливанию чугуна и ухудшает литейные свойства, ее содержание в чугуне обычно не превышает 0,15%.<sup>9</sup> Фосфор на процесс графитизации не влияет, зато улучшает жидкотекучесть, его содержание — до 0,3%.<sup>10</sup> При литье чугуна обычно стремятся к получению мелкозернистой структуры, что улучшает свойства металла. Оптимальными условиями для этого являются максимальное число центров кристаллизации и малая скорость роста кристаллов. Размер зерен при кристаллизации зависит от числа частичек нерастворимых примесей, которые играют роль готовых центров кристаллизации — оксиды, нитриды, сульфиды. Чем больше частичек, тем мельче зерна закристаллизовавшегося металла.

<sup>9</sup> При получении высокопрочного чугуна содержание серы должно быть не выше 0,04% (*примечание рецензента*).

<sup>10</sup> Фосфор чаще всего является нежелательной примесью, за исключением нескольких видов чугунов для художественного литья. При получении высококачественных чугунов его содержание ограничивается 0,08%. (*прим рец.*)

Значит, мелкозернистую структуру можно получить, когда в жидкие металлы добавляются посторонние вещества — модификаторы.

Очень важна для свойств сплава его металлическая основа: или перлит, или феррит, или оба вместе.

◆ **Серый, ковкий, высокопрочный...**

В зависимости от формы графита и условий его образования различают следующие группы чугунов: *серый* — с пластинчатым графитом (сч); *высокопрочный* — с шаровидным графитом (вч); *ковкий* — с хлопьевидным графитом (кч). На самом деле высокопрочный чугун — по сути тоже «серый», но по ГОСТу — нет. А ковкий чугун — это итог термической обработки «белого», из которого графит выделен «насильственным» образом. Ковкий чугун не куют — он тоже хрупок, как и серый. Откуда такое название — загадка.

*Серый* чугун наиболее широко применяется в машиностроении, так как легко лется, обрабатывается, к тому же дешев. В зависимости от прочности серый чугун подразделяют на 6 марок (ГОСТ 1412-85). Серые чугуны содержат углерода — 2,9...3,7%; крем-

ния — 1,2...2,6%; марганца — 0,5...1,0%; фосфора — не более 0,3%; серы — не более 0,15%.

Структура металлической основы зависит от количества углерода и кремния. С увеличением содержания углерода и кремния увеличивается склонность к образованию ферритной структуры металлической основы. Лучшими прочностными свойствами и износостойкостью обладают перлитные серые чугуны.

*Высокопрочные* чугуны (ГОСТ 7293-85) могут иметь ферритную (ВЧ35, ВЧ40), феррито-перлитную (ВЧ45, ВЧ50, ВЧ60) и перлитную (ВЧ70, ВЧ80)<sup>11</sup> металлическую основу. Получают эти чугуны из серых, в результате модифицирования магнием или церием (добавляется 0,03...0,07% от массы отливки). По сравнению с серыми чугунами, механические свойства выше, что вызвано отсутствием неравномерности в распределении напряжений из-за шаровидной формы графита. Высокопрочные чугуны содержат: углерода — 3,2...3,8%, кремния —

<sup>11</sup> Существует также ВЧ100 на бейнитной основе. Бейнит — это структура чугуна, которая образуется при специальной термической обработке. (прим. рец.)

1,8...2,8%, марганца — 0,3...0,8%, фосфора — до 0,1%, серы — до 0,02%.

Ковкий чугун получают отжигом белого. То есть, в данном случае в процессе охлаждения отливок нужно как раз предотвратить графитизацию (иначе графит будет не хлопьевидным, а пластинчатым). Для этого чугун должен иметь пониженное содержание углерода и кремния. Ковкие чугуны содержат: углерода — 2,4...3,0%, кремния — 0,8...1,4%, марганца — 0,3...1,0%, фосфора — до 0,2%, серы — до 0,1%.

В зависимости от температурного режима отжига можно по-разному разлагать цементит, получая ферритный, перлитный или ферритно-перлитный ковкий чугун. Отжиг является длительной, до 40 часов, операцией. В отсутствие специального оборудования это — дорогая операция, к тому же порождающая большой объем брака.

Различают 7 марок ковкого чугуна: три с ферритной (КЧ30-6) и четыре с перлитной (КЧ65-3) основой (ГОСТ 1215-79). По механическим и технологическим свойствам ковкий чугун занимает промежуточное положение между серым чугуном и сталью.