High-Carbon Steels

(Hypereutectoid Steels)

As the %C dissolved in austenite increases, the iron atoms are pushed further apart. This stretches the chemical bonds that hold the iron atoms together, generating a form of energy called strain energy. There is a limit to how much strain energy the austenite can stand. The amount of carbon dissolved in austenite when this limit is reached is called the solubility limit. Question: The solubility limit in austenite at 820 °C (1508 °F) is 1 wt% C. If an alloy containing 1.5 wt% C is heated to 820 °C (1508 °F), only 1% of this 1.5% C will be dissolved in the austenite. What happens to the remaining 0.5% C? This excess carbon becomes incorporated into a new phase called cementite. The new phase, cementite, has one major difference from austenite or ferrite. It is a chemical compound that exists at only one composition. Chemical compounds are generally represented by their elemental formulas, such as NaCl for sodium chloride table salt. The composition for NaCl is 50 atomic percent sodium, which corresponds to 39.3 weight percent sodium. The chemical element formula for cementite is Fe3C. For each atom of carbon in the compound, there are three atoms of iron, giving an atomic composition of 25 at.% C. The corresponding weight percent carbon in cementite is 6.7 wt% C. Other than this limitation to one composition, cementite has several similarities to austenite and ferrite. It is a crystal having its atoms arranged in regu- larly repeating geometrical arrays. The crystal structure is a little more complex than either the bcc of ferrite or the fcc of austenite, but it is well known. Also, it is a separate phase and is present as discrete grains. So, all the excess 0.5% C in this example at 820 °C (1508 °F) will be present as separate cementite grains mixed in with the austenite grains; that is, the microstructure will be a two-phase mixture of austenite and cementite.

The iron-carbon phase diagram extended to higher-carbon compositions where cementite becomes important is shown in Fig. 3.5. As before, the region on the temperature-composition map corresponding to austenite is shown as the central dark region. Because cementite exists at only one composition, it is shown on the phase diagram as a vertical line located at its composition, 6.7% C. Notice that the composition axis at the bottom of the diagram has a break in it just beyond 1.2%, and the value of 6.7% is located next to the break. If the break were not inserted, the 6.7% composition would appear roughly one foot to the right. To envision the true diagram, imagine extending the right portion approximately one foot, which expands the shaded two-phase region labeled γ ⵼ cm into a much larger area.

The line on the diagram labeled Acm deﬁnes the solubility limit for carbon in austenite. Notice that at 820 °C (1508 °F), this line gives a point at 1 wt% C, which is the maximum amount of carbon that can be dissolved in austenite at 820 °C (1508 °F). Alloys having %C compositions to the right of the Acm line are in the shaded two- phase region labeled γ + cm and must consist of a mixture of austenite and cementite grains. For example, consider a 1095 steel (0.95 wt% C) received from a steel mill. If this steel is heated to 760 °C (1400 °F), the temperature-composition point will be at the open circle in Fig. 3.5 with the horizontal arrowed line passing through it. Because the temperature-composition point lies in the shaded two-phase region labeled γ + cm, this steel must consist of a mixture of austenite having composition O (0.85% C) and cementite of composition P (6.7% C). The diagram does not describe what the microstructure will look like; however, experiments show that the micro- structure will be as illustrated at the bottom of Fig. 3.5. All of the cementite appears as small, spherically shaped grains distributed fairly randomly over the austenite grains, which have much larger sizes and the typical curved grain boundaries.

To further illustrate the use of the phase diagram in understanding how microstructure changes during heat treatment, consider an ex-periment where the as-received 1095 steel is heated to 850 °C (1560 °F) and held for 20 min or so. As shown on the phase diagram of Fig. 3.6, this temperature-composition point corresponds to the single-phase austenite region. Assuming the structure could be observed in a hot stage microscope, the small region under observation at high magniﬁcation may consist of just three grains, which would have an appearance simi- lar to that shown in Fig. 3.6. If the temperature of the hot stage is lowered to 760 °C (1400 °F), then this temperature-composition point lies in the two-phase austenite ⵼ cementite region, which means that cementite grains must form on cooling. Just as is the case for the hypoeutectoid steel of Fig. 3.3, where ferrite forms on the austenite grain boundaries during cooling, here cementite forms on the austenite grain boundaries during cooling. As shown in Fig. 3.6, the ﬁnal microstructure has all of the prior- austenite grain boundaries from the 850 °C (1560 °F) structure ﬁlled with thin, plate- shaped grains of cementite. Notice the dramatic difference in this microstructure from that shown in Fig. 3.5, where the 1095 steel was heated directly from room temperature to 760 °C (1400 °F). Both microstructures contain the same volume fraction of cementite and austenite, but the distribution of the cementite is quite different. Unlike austenite and ferrite, cemen- tite is very brittle. Consequently, the 1095 structure of Fig. 3.6 with its interconnected cementite plates is not as tough as the Fig. 3.5 structure with its small, isolated cementite grains. Again, this is an example of how heat treatment can change microstructure, which, in turn, changes mechanical properties.

Високовуглецеві сталі (Гіперевтектоїдні сталі)

По мірі того як % C, розчинений в аустеніті, збільшується, атоми заліза відштовхуються далі один від одного. Це розширює хімічні зв'язки, які утримують атоми заліза разом, створюючи форму енергії, що називають енергією деформації. Існує межа того, скільки енергії деформації може витримати аустеніт. Кількість вуглецю, розчиненого в аустеніті при досягненні цієї межі, називається межею розчинності. Питання: Межа розчинності в аустеніті при температурі 820 °C (1508 °F) становить 1% маси С. Якщо сплав, що містить 1,5 мас.% С, нагрівають до 820 °С (1508 °F), тільки 1% від цього 1,5% C буде розчинений в аустеніті. Що відбувається з рештою 0,5% C? Цей надлишок вуглецю включається в нову фазу, звану цементитом. Нова фаза, цементит, має одну важливу відмінність від аустеніту або фериту. Це хімічна сполука, яка існує тільки в одному складі. Хімічні сполуки зазвичай представлені їх елементарними формулами, такими як NaCl для повареної солі хлориду натрію. Склад NaCl становить 50 атомних відсотків натрію, що відповідає 39,3 ваговим відсоткам натрію. Формулою хімічного елемента для цементиту є Fe3C. Для кожного атома вуглецю в з'єднанні є три атома заліза, що утворюють атомний склад 25 ат.% С. Відповідний ваговій відсоток вуглецю в цементиті становить 6,7 мас.%. Крім обмеження одного складу, цементит має кілька подібностей з аустенітом і феритом. Це кристал, що має атоми, розташовані в регулярно повторюваних геометричних множинах. Кристалічна структура трохи складніша, ніж ОЦК фериту або ГЦК аустеніту, але вона добре відома. Крім того, це окрема фаза, присутня у вигляді дискретних зерен. Таким чином, весь надлишок 0,5% C в цьому прикладі при 820 °C (1508 °F) буде присутній у вигляді окремих зерен цементиту, змішаних з зернами аустеніту; тобто мікроструктура буде являти собою двофазну суміш аустеніту і цементиту.

Діаграма фазового стану залізо-вуглецю, розповсюджена на склади з більш високим вмістом вуглецю, де цементит стає важливим, показана на рис. 3.5. Як і раніше, область на карті температурного складу, відповідна аустеніту, показана як центральна темна область. Оскільки цементит існує тільки в одному складі, він показаний на діаграмі стану як вертикальна лінія, розташована в її складі, 6,7% C. Зверніть увагу, що знизу діаграми в осі складу є розрив(Break) трохи вище 1,2%, а значення 6,7% знаходиться поруч з розривом. Якщо б розрив не був вставлений, склад 6,7% з'явився б приблизно на 1 фут вправо. Щоб уявити собі точну діаграму, уявіть, що права частина розтягується приблизно на один фут, що розширює заштриховану двофазну область, позначену як γ+ cm, на набагато більшу площу.

Лінія на діаграмі, позначена Acm, визначає межу розчинності вуглецю в аустеніті. Зверніть увагу, що при 820 °C (1508 °F) ця лінія зображує точку з 1 мас.% C, яка представляє собою максимальну кількість вуглецю, який можна розчинити в аустеніті при температурі 820 °C (1508 °F). Сплави, що містять склади %C праворуч від лінії Acm, знаходяться в заштрихованої двофазній області, позначені як γ + cm, та повинні складатися з суміші зерен аустеніту і цементиту. Як приклад розглянемо сталь 1095 (0,95 мас.% C), отриману зі сталеливарного заводу. Якщо ця сталь нагрівається до 760 °C (1400 °F), точка температурного складу(стану?) буде знаходитися на відкритому колі на рис. 3.5 разом з горизонтальної стрілкою, що проходить через нього. Оскільки точка температурного стану знаходиться в заштрихованій двофазній області, позначеній як γ + cm, ця сталь повинна складатися з суміші аустеніту, що має склад O (0,85% C) і цементиту складу P (6,7% C). Діаграма не описує, як буде виглядати мікроструктура; однак експерименти показують, що мікроструктура буде такою, як зображено в нижній частині рис. 3.5. Весь цементит представлений у вигляді невеликих зерен сферичної форми, розподілених повністю у випадковому порядку над зернами аустеніту, які мають значно більші розміри і типові викривлені межі зерен.

Для подальшої ілюстрації використання фазової діаграми з розумінням того, як під час термообробки змінюється мікроструктура, розглянемо експеримент, в якому сталь 1095 в стані безпосередньої термічної обробки нагрівають до 850 °С (1560 °F) і витримують протягом 20 хвилин або близько того. Як показано на фазовій діаграмі рис. 3.6, ця точка температурного стану відповідає однофазній області аустеніту. Виходячи з того, що структура може спостерігатися в мікроскопі для високотемпературних досліджень, невелика область під наглядом при великому збільшенні може складатися всього з трьох зерен, які матимуть вигляд, аналогічний зображеному на рис. 3,6. Якщо температура гарячої стадії знижується до 760 °C (1400 °F), то ця точка температури стану знаходиться в двофазній області аустенітного цементиту, що означає, що при охолодженні повинні утворюватися зерна цементиту. Як і в разі гіпоевтектоідної сталі на рис. 3.3, де ферит утворюється на межах зерен аустеніту при охолодженні, цементит також утворюється на межах зерен аустеніту при охолодженні. Як зображено на рис. 3.6, остаточна мікроструктура має всі межі колишніх аустенітних зерен зі структури 850 °C (1560 °F), заповнену тонкими, пластинчастими зернами цементиту. Зверніть увагу на сильну відмінність цієї мікроструктури від показаної на рис. 3,5, де сталь 1095 нагрівали безпосередньо від кімнатної температури до 760 °С (1400 °F). Обидві мікроструктури містять однакову об'ємну долю цементиту і аустеніту, але розподіл цементиту зовсім інший. На відміну від аустеніту і фериту, цементит дуже крихкий. Відтак, структура 1095 рис. 3.6 зі зв'язаними цементитними пластинами не така щільна, як на рис. 3.5 з невеликими ізольованими зернами цементиту. Знову ж таки, це приклад того, як теплова обробка може змінити мікроструктуру, яка, в свою чергу, змінює механічні властивості.