

М.Ф.Евсюков, Д.В.Лошкарев

ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ АУСТЕНИТА В ЗАЭВТЕКТОИДНЫХ СТАЛЯХ ПОСЛЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Изучены особенностей кинетики структурных и фазовых превращений аустенита заэвтектоидных сталей при охлаждении с различными скоростями после кристаллизации и отдельного нагрева. Описаны закономерности выделения вторичного цементита и его влияние на распад аустенита с образованием перлита и мартенсита. Показано, что основными факторами, влияющим на кинетику распада аустенита после кристаллизации, является выделение пластинчатого вторичного цементита при различных скоростях охлаждения.

заэвтектоидные стали, кристаллизация, распад аустенита, вторичный цементит, перлит, мартенсит.

Состояние вопроса. Термокинетические и изотермические диаграммы, отображающие закономерности распада аустенита после отдельного нагрева, в настоящее время построены для большинства сталей и чугунов [1,2]. Определена устойчивость аустенита при различных скоростях охлаждения и в изотермических условиях в зависимости от характера и степени легирования, режима предварительной обработки и технологических режимов нагрева. Данных об устойчивости аустенита после кристаллизации и об особенностях структурообразования, особенно в высокоуглеродистых инструментальных сталях, в литературе мало. Так в работе [3] на белом валковом чугуне показано, что аустенит после кристаллизации имеет более высокую устойчивость, как при непрерывном охлаждении, так и в изотермических условиях. Высказано мнение о том, что повышенная устойчивость аустенита после кристаллизации (первородный аустенит) обусловлена малой дефектностью кристаллического строения дендритных ветвей в чугуне. Аустенит после отдельного нагрева (вторичный аустенит) содержит много дефектов кристаллического строения в том числе и границы зерен, возникающих в результате $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения при охлаждении после кристаллизации и последующего $\alpha \rightarrow \gamma$ при нагреве. Кроме этого показано, что в первородном аустените при закалке всегда образуется крупноигльчатый мартенсит и сохраняется большое количество остаточного аустенита., что не характерно для белых чугунов, охлаждаемых после отдельного нагрева. Это выдвигает необходимость проведения широкого круга исследований по изучению особенностей структурообразования в литых деталях после кристаллизации с целью получения оптимального комплекса механических свойств с использованием тепла кристаллизации. Систематические данные по кинетике структурообразования особенно в низколегированных заэвтектоидных сталях после кристаллизации в литературе не выявлены

Постановка задачи. Исследование закономерности кинетики фазовых превращений в заэвтектидных сталях при охлаждении после кристаллизации и отдельного нагрева. Изучение влияния легирующих элементов на морфологию продуктов распада и их свойства. Оценка влияния скоростей охлаждения на количество остаточного аустенита в исследуемых сталях как после кристаллизации, так и после отдельного нагрева.

Методика проведения исследования. Исследование проводилось на заэвтектидных сталях двух составов. Нелегированная сталь имела состав: 1,45%С, 0,14%Si, 0,36%Mn, 0,025%S, 0,012%P. Легированная сталь имела состав: 1,45%С, 0,14%Si, 0,93%Mn, 1,06%Ni, 0,89%Cr, 0,025%S, 0,012%P. При исследовании кинетики выделения вторичного цементита применялся закалочно – микроструктурный метод, а при исследовании кинетики мартенситного превращения использовался dilatометрический метод исследования. Навески белого чугуна по 10 –20г помещали в кварцевые трубки и расплавляли в печи Таммана конструкции Института черной металлургии. Выдерживали около 5 мин и после этого одну часть образцов охлаждали с выключенной печью, а вторую часть литых образцов после кристаллизации охлаждали до 900⁰С, переносили в муфельную печь с температурой 900⁰С и выдерживали от 30 мин и до 24 часов. После выдержки литые образцы закаливали в воде или охлаждали на воздухе. Первую часть образцов после охлаждения на воздухе со структурой перлита нагревали также до 900⁰С, выдерживали до 24 часов и через определенные интервалы закаливали в воде или охлаждали на воздухе. Строение продуктов распада изучали микроструктурным методом на микроскопе НЕОФОТ–2 после травления 4% ниталем. Для выявления границ аустенитных зерен и вторичного цементита образцы травили в 1% растворе синтола в насыщенном водном растворе пикриновой кислоты [4]. Балл зерна аустенита в заэвтектидных сталях после отдельного нагрева определяли по стандартной шкале ГОСТ 5639.

Изложение основных материалов исследования. В исследуемых сталях в процессе кристаллизации между дендритами, имеющими различную кристаллографическую ориентацию, формируется первичное аустенитное зерно (рис.1,а). Протяженность кристаллизационных границ сравнительно мала. В процессе охлаждения растворимость углерода в аустените понижается и при температуре около 1000⁰С достигает предельного значения. В процессе дальнейшего охлаждения из пересыщенного аустенита выделяется углерод в виде цементитных игл и пластин. Частично вторичный цементит выделяется на первичных границах, а основная масса вторичного цементита при дальнейшем охлаждении выделяется внутри дендритных ветвей аустенита с различной ориентировкой в пространстве (рис.1,б). При этом, температура начала выделения вторичного цементита зависит от скорости охлаждения. Так при скоростях охлаждения ниже 0,03⁰С/с он выделяется при температурах 850⁰ –900⁰С. С увеличением скорости охлаждения до 0,8⁰С/с она понижается до 700 – 750⁰С. При ско-

ростях охлаждения выше $50^{\circ}\text{C}/\text{с}$ выделение вторичного цементита из переохлажденного аустенита вообще тормозится. Исследования в ранее выполненных работах [5, 6] показали, что вторичный цементит выделяется и растет в виде пластин со слоистым механизмом роста. Как показали исследования, в процессе охлаждения и в процессе отжига при температуре 900°C в течение 24 часов зеренное строение в аустените не появляется, а вторичный цементит не сфероидизируется. Это свидетельствует о том, что аустенит после кристаллизации не имеет достаточного количества дефектов кристаллического строения для формирования границ зерен и субграниц. С другой стороны это свидетельствует о хорошем кристаллографическом соответствии границ аустенита и вторичного цементита.

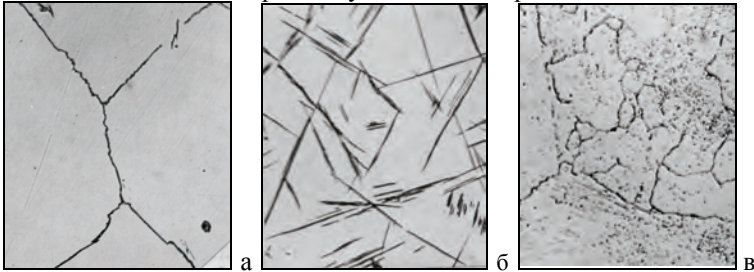


Рис.1. Первичное зерно (а) и вторичный цементит (б) в стали после кристаллизации и зернистое строение аустенита после отдельного нагрева (в). $\times 700$. Реактив [4].

В нелегированной заэвтектоидной стали поведение вторичного цементита при отжиге аналогичное. Это дает основание утверждать, что легирующие элементы, такие как марганец, никель и хром в количестве до 1%, не оказывают влияние на поведение вторичного цементита в процессе отжига. Выделение вторичного цементита способствует обеднению пограничных слоев аустенита до эвтектоидного состава. В процессе дальнейшего охлаждения при скоростях ниже $0,3^{\circ}\text{C}/\text{с}$ аустенит продолжает обедняться углеродом как за счет дальнейшего его выделения на вторичном цементите, так и за счет образования новых пластин. Кроме этого, углерод выделяется и на первичных границах в виде цементитной сетки. Однако их протяженность не велика.

В тоже время, в аустените после кристаллизации и двойной фазовой перекристаллизации появляется зеренное строение 9–11 балла стандартной шкалы при повторном нагреве до 900°C (рис.1,в). Цементитная сетка по границам первичных зерен аустенита после кристаллизации при повторном нагреве и выдержке разделяется на фрагменты и сфероидизируется. Вторичный цементит частично сохранившийся при повторном нагреве также подвергается сфероидизации аналогично вторичному цементиту белого чугуна [7, 8]. В легированной заэвтектоидной стали результаты получены аналогичные. При этом, вторичный пластинчатый

цементит в виде игл и пластин растворился, а вместо него появился цементит в виде очень тонкой цементитной сетки. Однако, присутствуют и аустенитные границы на которых цементитная сетка отсутствует.

Отсутствие границ зерен в аустените после кристаллизации оказало существенное влияние как на устойчивость и кинетику распада его по диффузионному механизму с образованием перлита, так и на кинетику и температурные интервалы распада переохлажденного аустенита по сдвиговому механизму с образованием мартенсита. Так, в легированной заэвтектоидной стали распад аустенита по диффузионной кинетике начинается при скорости охлаждения $0,8^{\circ}\text{C}/\text{с}$. Первые перлитные зародыши появляются при температуре 510°C и растут как единичные колонии на границе с вторичными цементитными пластинами. (рис.2,а).

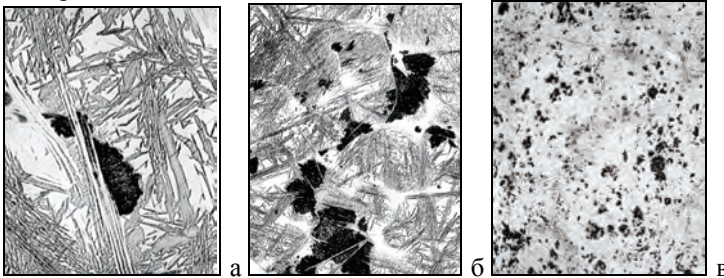


Рис.2. Перлит в структуре стали после кристаллизации (а, б) и отдельно нагрева (в). Ниталь, $\times 700$.

С уменьшением скорости охлаждения до $0,3^{\circ}\text{C}/\text{с}$ температура начала зарождения перлита резко повышается до 630°C . В процессе дальнейшего охлаждения распад осуществляется, в основном, за счет роста ранее образовавшихся перлитных центров (рис.2,б). При этом, во многих местах обедненный углеродом аустенит на границе с пластинами вторичного цементита сохраняется. В процессе охлаждения до 560°C степень распада увеличивается и составляет 100%. При дальнейшем уменьшении скорости до $0,07^{\circ}\text{C}/\text{с}$ температурный интервал распада повышается незначительно и составляет $630 - 660^{\circ}\text{C}$., время распада увеличивается до 2800с, а кинетика распада сохраняется такой же как и при предыдущей скорости охлаждения.

Появление границ зерен после отдельного нагрева в аустените после кристаллизации оказало существенное влияние, как на устойчивость, так и на кинетику превращения при всех исследованных скоростях охлаждения. Первые перлитные зародыши появляются при охлаждении со скоростью $11^{\circ}\text{C}/\text{с}$. С уменьшением скорости охлаждения до $3,5^{\circ}\text{C}/\text{с}$ температурный интервал распада аустенита резко повышается и составляет $560 - 660^{\circ}\text{C}$. При этом, перлитных зародышей образуется много и все они появляются на границах аустенитных зерен. (рис.2,в). Это связано с наличием мелкозернистой структуры 9 –11 балла стандартной шкалы с большой

протяженностью межзеренных границ. В процессе дальнейшего охлаждения распад продолжается как за счет образования новых перлитных зародышей, так и за счет роста ранее образовавшихся перлитных зерен. При минимальной скорости охлаждения, равной $0,07^{\circ}\text{C}/\text{с}$ температурный интервал распада повышается незначительно и равен $660 - 690^{\circ}\text{C}$

Сравнительный анализ показал, что аустенит после кристаллизации с пластинчатым вторичным цементитом имеет более высокую устойчивость [9,7] по сравнению с этим же аустенитом после отдельного нагрева, имеющем зернистое строение 9 –11 балла стандартной шкалы. Незначительная скорость зарождения новых перлитных зародышей в обедненном аустените вокруг пластин вторичного цементита свидетельствует о хорошем соответствии кристаллографических плоскостей в аустените и цементите и малой свободной энергии, не способствующей зарождению перлитных центров в процессе охлаждения. Мелкозернистое строение этой же стали после отдельного нагрева способствует большой скорости зарождения перлитных центров на границе аустенитных зерен с большими углами разориентации, а следовательно, и с большим уровнем зернограничной энергии.

При скоростях охлаждения после кристаллизации выше критической, равной $50^{\circ}\text{C}/\text{с}$ – скорости охлаждения при которой тормозится выделение вторичного цементита в заэвтектоидной стали, пересыщенный углеродом аустенит при охлаждении сохраняется до температуры начала мартенситного превращения. Для заэвтектоидной стали с $1,5\% \text{C}$ температура начала мартенситного превращения равна 45°C . (рис.3, кр.1). В процессе охлаждения до комнатной температуры образуются отдельные очень крупные мартенситные иглы (рис.4,а) в количестве от 20 до 30 %. Остальной аустенит сохраняется в количестве 70 –80%.

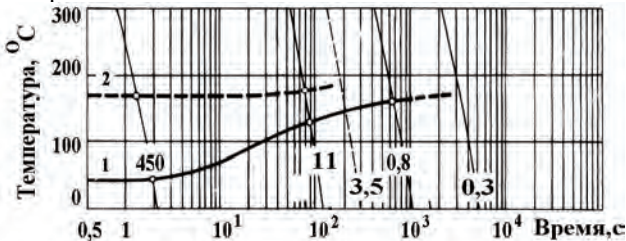


Рис.3. Температура начала мартенситного превращения аустенита стали после кристаллизации (1) и отдельного нагрева (2) в зависимости от скорости охлаждения.

При скоростях охлаждения ниже $50^{\circ}\text{C}/\text{с}$ после кристаллизации за счет большого пересыщения углеродом из аустенита выделяется вторичный цементит в виде цементитной сетки по междендритным границам (границам первого рода) и внутри дендритов в виде цементитных пластин различной величины и направления. Это и приводит к повышению температуры начала мартенситного превращения [10, 11], а, следовательно, и к

увеличению степени распада аустенита на крупноигльчатый мартенсит вокруг пластин вторичного цементита (рис.4,б). Так, при скорости охлаждения $11^{\circ}\text{C}/\text{с}$ температура начала мартенситного превращения повышается до 135°C , степень распада повышается до 60–70%. Дальнейшее уменьшение скорости охлаждения до минимальной скорости охлаждения, равной $0,8^{\circ}\text{C}/\text{с}$, при которой еще сохраняется переохлажденный аустенит, приводит к дальнейшему повышению температуры начала мартенситного превращения до 160°C . Степень распада повышается соответственно до 90%. И в этом случае образуются очень крупные мартенситные иглы, расположенные под определенными углами между собой.

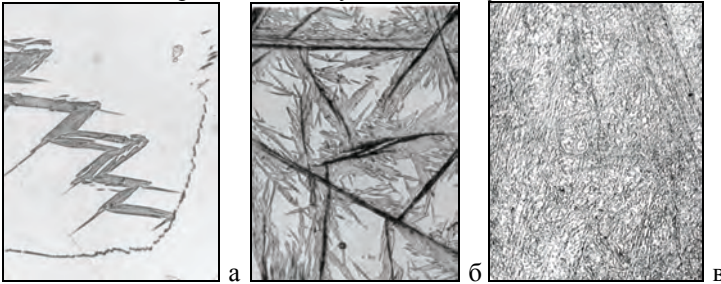


Рис.4. Мартенсит в структуре стали после кристаллизации (а, б) и отдельного нагрева (в), а, в – ниталь, б – пикрат + ниталь, $\times 700$.

В интервале скоростей охлаждения от $0,8$ до $0,3^{\circ}\text{C}/\text{с}$ после выделения вторичного цементита при температурах ниже 650°C начинается распад переохлажденного аустенита с образованием перлита. В интервале скоростей охлаждения, в котором степень распада аустенита на перлит увеличивается от нуля до 100%, темп повышения температуры начала мартенситного превращения замедляется и составляет всего 5–7%. В этом случае мартенситные иглы имеют более мелкое строение, однако, их игльчатое строение проявляется довольно четко.

Мелкозернистая структура аустенита заэвтектоидной стали, образовавшаяся после отдельного нагрева, оказала существенное влияние на температуру начала мартенситного превращения и степень распада в процессе дальнейшего охлаждения до комнатной температуры. Аустенит после отдельного нагрева в отличие от аустенита после кристаллизации при всех скоростях охлаждения выше критической имеет одинаковую температуру начала мартенситного превращения, равную 165°C (рис.3, кривая 2) и одинаковую степень распада аустенита на мартенсит, равную 80–90%. Аналогичные результаты были получены и в ранее выполненной работе [12]. Мартенсит имеет однородное мелкоигльчатое строение (рис.4,в). Предварительный частичный распад аустенита по диффузионной кинетике с образованием перлита способствовал дальнейшему повышению температуры начала мартенситного превращения до 170°C . Мор-

фология мартенсита, образовавшегося при распаде остаточного аустенита, не изменилась, а степень распада приблизилась к нулю.

Легирующие элементы, такие как Mn, Ni, Cr, вводимые в заэвтектоидные стали в количестве до 1%, практически не изменили характер изменения температуры начала мартенситного превращения в исследуемом интервале скоростей охлаждения, как при охлаждении после кристаллизации, так и после отдельного нагрева. Сохранилась и различная морфология мартенсита при охлаждении после кристаллизации и отдельного нагрева. Не оказало влияние изменение содержания углерода на строение мартенсита, образовавшегося при охлаждении как после кристаллизации, так и после отдельного нагрева.

Таким образом, основными факторами, влияющим на кинетику распада аустенита после кристаллизации является выделение пластинчатого вторичного цементита при различных скоростях охлаждения. В аустените после отдельного нагрева – это мелкозернистое строение аустенита, имеющего повышенную дефектность, как за счет большой протяженности границ, так и дефектов кристаллического строения самого зерна, за счет двухкратного полиморфного превращения. Малая протяженность междендритных границ (границы первого рода) в аустените после кристаллизации не оказала существенного влияния на кинетику мартенситного превращения аустенита дендритных ветвей. Легирующие элементы, такие как марганец, никель и хром, не оказали влияние на склонность к образованию границ зерен в аустените после кристаллизации. Отсутствие границ зерен в ветвях дендритов после кристаллизации способствует при температуре ниже температуры начала мартенситного превращения и при всех исследованных скоростях охлаждения образованию крупноигльчатого мартенсита. Выделение вторичного цементита в аустените после кристаллизации способствует обеднению углеродом в прилегающих слоях. Это в свою очередь способствует понижению устойчивости аустенита и повышению температуры начала мартенситного превращения от 45° до 165°C . и понижению остаточного аустенита от 80% до 0–2% при скорости охлаждения $0,3^{\circ}\text{C}/\text{с}$ и ниже. Таким образом, при скоростях охлаждения до $0,3^{\circ}\text{C}/\text{с}$ температура начала мартенситного превращения аустенита после кристаллизации и после повторного нагрева практически одинаковы и находятся в интервале $165\text{--}170^{\circ}\text{C}$.

Выводы.

1. Аустенит заэвтектоидной стали после кристаллизации имеет повышенную устойчивость при всех скоростях охлаждения. Критическая скорость охлаждения аустенита после кристаллизации в 8–10 раз меньше по сравнению с этим же аустенитом, но после отдельного нагрева.

2. Аустенит после отдельного нагрева имеет мелкозернистое строение с большим уровнем межзеренной свободной энергии.

3. Аустенит после кристаллизации в пределах дендритных ветвей является монокристалльным. Границы зерен в стали в процессе кристаллизации появляются только на стыке дендритов.

4. В процессе охлаждения из пересыщенного углеродом аустенита выделяется по плоскостям с минимальной свободной энергией вторичный цементит пластинчатой формы. В процессе охлаждения и при изотермическом отжиге при 900°C в течение до 24 часов он не сфероидизируется.

5. В аустените после отдельного нагрева формируется мелкозернистое строение 9 – 11 балла стандартной шкалы. Большеугловые границы зерен имеют высокую межзеренную свободную энергию.

6. Распад аустенита после кристаллизации осуществляется за счет зарождения перлитных центров в обедненном углеродом аустените на границе с пластинчатым вторичным цементитом. Скорость зарождения перлитных центров мала за счет низкой свободной энергии межфазной границы А/П

7. Распад аустенита после отдельного нагрева по диффузионному механизму осуществляется на границах аустенитных зерен в отличие от аустенита после кристаллизации с зарождения большого количества перлитных центров. Это обеспечило более низкую устойчивость аустенита при всех исследованных скоростях охлаждения.

8. Аустенит после кристаллизации при скоростях выше критической распадается по сдвиговому механизму с образованием крупноиглочатого мартенсита. При этом, температура начала мартенситного превращения зависит от скорости охлаждения. При скоростях охлаждения, исключающих выделение вторичного цементита, температура начала мартенситного превращения минимальная и равна 45°C ., а степень распада 20 – 30%. Выделение вторичного цементита в аустените после кристаллизации способствует распаду аустенита вокруг пластин с образованием крупноиглочатого мартенсита на межфазной границе А/Ц. с повышением температуры начала мартенситного превращения с до 170°C при скорости охлаждения выше $0,8^{\circ}\text{C}/\text{с}$.

9. Температура начала мартенситного превращения аустенита после отдельного нагрева не зависит от скорости охлаждения и равна $165\text{--}170^{\circ}\text{C}$. В процессе охлаждения с различными скоростями образуется очень мелкоиглочатый мартенсит.

1. *Попова Л. Е., Попов А. А.* Диаграммы превращения аустенита в сталях и бета-раствора в сплавах титана. // Справочник термиста. – М: Металлургия, 1991. – 502с.
2. *Wever F., Rose A., Peter W., Strassburd W., Rademacher L.* Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle. – 1954, 1956, 1958.
3. *Булнина Ю. К., Таран Ю. Н.* Структурные превращения аустенита в белых валковых чугунах после кристаллизации. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1965. – №6. – С.151–155.

4. *Краснова Л.К., Смирнова Е.В.* Реактив для выявления аустенитного зерна. // Заводская лаборатория. – 1963. – №10 (29). – С. 1204–1205. .
5. *Новик В.И., Таран Ю.Н.* Рост и структура кристаллов цементита. // Сб. Рост и несовершенство металлических кристаллов. – Киев: Наукова Думка, 1966. – 257с.
6. *Таран Ю. Н., Новик В.И.* Строение цементита белого чугуна. // Литейное производство. – 1967. № 1. – С.34.
7. *Механизм деления кристаллов цементита при сфероидизирующем отжиге.* / А.А.Баранов, К.П.Бунин, М.Ф.Евсюков, М.И.Притоманова // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 1969. –№ 6. –С.1–3.
8. *Бунин К. П.* Железоуглеродистые сплавы. – К.– М.: Машгиз, 1949. – 212с.
9. *Особенности превращения первородного аустенита белого чугуна при охлаждении.* / К.П.Бунин, М.Ф.Евсюков, И.Е.Лев, М.И.Притоманова // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия.* – 1969. №2. – С.121–127.
10. *Шкляр Р. Ш., Попов А. А.* Термокинетические диаграммы распада аустенита в некоторых промышленных марках стали. // Сб. «Проблемы металловедения и термической обработки». – М:Машгиз, 1956. – 239с.
11. *Warlimont H.* Epitahial nucleation of martensite on cementite. // *Trans. Metallurg. Soc. AIME.* – 1962. – 224, 3. – P.495–499.
12. *Гуляев А.П., Акшенцева А.П.* Влияние скорости охлаждения на кинетику превращения аустенита в мартенсит. – 1955, 2. –С.38.

*Статья рекомендована к печати
докт.техн.наук, проф. Г.В.Левченко,*

М.Ф.Євсюков, Д.В.Лошкарєв

Фазові перетворення аустеніту в заєвтектоїдних сталях після кристалізації

Метою роботи є вивчення особливостей кінетики структурних і фазових перетворень аустеніту заєвтектоїдних сталей при охолодженні з різними швидкостями після кристалізації й окремого нагрівання. Описано закономірності виділення вторинного цементиту і його вплив на розпад аустеніту з утворенням перліту і мартенситу.