



УДК 620.1:669.112.227.1:669.141.24:621.746.62

© 2010

А. Ю. Борисенко, А. А. Кононенко, А. И. Бабаченко,
Л. Д. Науменко

Микроструктурные исследования формирования первичного зерна аустенита после кристаллизации углеродистых сталей с 0,5–0,7% С

(Представлено академиком НАН Украины Б. А. Мовчаном)

Досліджено формування первинного зерна аустеніту у вуглецевих сталях з 0,5–0,7% С після кристалізації. Встановлений зв'язок первинних зерен аустеніту з його вихідною дендритною будовою. В структурі литих сталей з 0,5–0,7% С спостерігаються два типи міжкристалітних границь: міждендритні, що утворюються при зростанні дендритних гілок, і внутрішньодендритні, що перетинають дендрити в довільних напрямках.

Важным элементом первичной структуры сталей, кристаллизующихся с образованием аустенита, являются межкристаллитные границы разного происхождения и строения, ансамбль которых формирует его исходное зеренное строение. Считается, что размер зерна поликристаллических материалов и, в частности аустенита в стали, является одним из основных параметров, определяющих их свойства. Однако результаты работ последних лет [1] показывают, что на свойства металлов существенное влияние оказывает не только размер зерна, но и атомно-кристаллическое строение имеющихся межкристаллитных границ. Изучение механизмов образования, строения и свойств межкристаллитных границ металлов является актуальным в вопросах современного материаловедения [2].

Несмотря на большую историю развития представлений о строении и свойствах границ зерен в металлах [3–5 и др.], такие исследования применительно к конструкционным сталям весьма ограничены, что не позволяет находить новые решения дальнейшего повышения их свойств. В указанной проблематике исследования формирования первичного зерна в стали являются, пожалуй, самыми давними и многочисленными, начиная с классических работ Д. К. Чернова. Однако до сих пор не выяснен один из ключевых вопросов формирования первичной структуры сталей — переход от дендритного к зеренному строению аустенита после кристаллизации.

Широкое распространение получило мнение, высказанное в середине XX века К. П. Буниным [6], что формирование полиэдрического строения в стали после кристаллизации происходит путем спрямления волнистых границ соприкасающихся дендритов. Поэтому на месте каждого дендрита аустенита должно образовываться соответствующее ему зерно. Возможно также образование зерен вокруг групп из нескольких дендритов. В любом из этих случаев границами зерен являются только места срастания дендритов. Подобная схема формирования первичного зерна в стали приводится как зарубежными исследователями [7], так и авторами современной учебной литературы [8].

Существует и другое мнение о механизме формирования первичной зеренной структуры металлов после кристаллизации. В работе [4] на примере цветных металлов и некоторых сплавов железа показано, что в литых металлах и сплавах формируются принципиально два типа границ — первичные, соответствующие местам срастания первичных кристаллитов (дендритов), и вторичные, образующиеся внутри них. При этом границы первичных зерен, в общем случае, ориентированы произвольно к расположению дендритов. Применительно к сталям такие исследования были выполнены только для малоуглеродистой стали с 0,11% С (Ст. 3).

Цель настоящей работы — изучение формирования первичной зеренной структуры аустенита после кристаллизации и установление ее связи с исходным дендритным строением в средне- и высокоуглеродистых доэвтектоидных сталях.

Материал и методика исследований. Исследования выполнены на образцах заперитектических доэвтектоидных сталей с 0,52, 0,62 и 0,67% С, кристаллизующихся однофазными по реакции $\delta \rightarrow \gamma$, т. е. сразу с образованием аустенита из жидкости. Формирующаяся при однофазной кристаллизации дендритная структура аустенита позволила установить однозначную связь ее с зеренной структурой, что было бы затруднительно в сталях до- и перитектического состава, в которых образованию аустенита предшествует дендритная кристаллизация δ -феррита и последующее его $\delta \rightarrow \gamma$ превращение.

Плавление, кристаллизацию и охлаждение стали до заданной температуры осуществляли в лабораторных условиях в печи сопротивления. В качестве шихты использовали мартеновскую углеродистую сталь колесного назначения с соответствующим содержанием углерода. После расплавления шихты при 1540 °С и выдержки при этой температуре в течение 15 мин печь выключали и производили охлаждение расплава (слитка) в алундовом тигле с печью до температур 1400, 1100, 800, 750 и 700 °С. После достижения слитком заданной температуры его закачивали в воде.

После кристаллизации слитки диаметром 25 и высотой 20 мм разрезались на две половины и подвергались микроструктурным исследованиям. Окончательная полировка образцов выполнена электролитическим способом. Анализ дендритной структуры осуществляли по следам химической неоднородности распределения химических элементов, возникающей при кристаллизации стали и выявляющейся травлением шлифов в горячем растворе пикрата натрия. Использовали также травление в 4%-ном спиртовом растворе азотной кислоты (нитале). Для удаления со шлифов продуктов полировки и травления применяли ультразвуковую очистку.

Результаты и обсуждение. Микроструктурные исследования показали принципиально одинаковые закономерности формирования дендритно-зеренной структуры во всех анализируемых сталях. Наблюдаются лишь некоторые отличия в морфологии дендритов, связанные с влиянием углерода на их строение. Приведенные ниже результаты исследований стали с 0,62% С аналогичны и для сталей с 0,52 и 0,67% С. Рассмотрим эти результаты.

Закалка от температуры 1400 °С фиксирует двухфазное твердожидкое состояние стали, выявляющееся после травления в пикрате натрия в виде структуры дендритов различной величины (рис 1, а). Травление в нитале выявляет межкристаллитные границы разной топографии на общем фоне мартенситной структуры. В структуре стали часто наблюдаются пакеты мартенсита большой протяженности с ярко выраженной направленностью образования, меняющейся как в пределах отдельных зерен, так и между ними. Межкристаллитные границы первичных аустенитных зерен наиболее четко видны после травления шлифа в пикрате натрия, выявляющего химическую неоднородность мартенситной структуры (рис 1, б). Обнаруживаются цепочки закономерно ориентированных монопластин мартенсита, часто выходящих своими широкими гранями в плоскость сечения шлифа. Выявляемые травлением в пикрате натрия цепочки монопластин мартенсита, часто имеющие прерывистое строение и отклонения от прямолинейного распространения, показывают положение границ первичных зерен аустенита относительно его исходной дендритной структуры.

В первичной структуре аустенита наблюдаются два основных типа межкристаллитных границ, которые можно классифицировать по их расположению: *междендритные*, образующиеся при срастании соприкасающихся дендритов и их ветвей, и *внутридендритные*, располагающиеся внутри (в теле) дендритов, пересекая их и часто изменяя свое направление на междендритных стыках.

Формирование ориентированных монопластин мартенсита происходит, как правило, на внутридендритных границах. На междендритных границах, особенно в стыках нескольких дендритов, часто наблюдается неупорядоченное расположение мартенситных кристаллов или изменение их кристаллографической ориентировки. В большинстве случаев как отдельные пластины мартенсита, так и одинаково направленные их группы (пакеты) принадлежат нескольким дендритным ветвям, пересекая их границы срастания без изменения направления расположения в плоскости шлифа. Сопоставляя интенсивность цветового окрашивания пикратом натрия химической неоднородности при выявлении дендритной структуры, можно констатировать, что в наиболее темных участках с максимальной ликвацией — стыках нескольких дендритных ветвей — наблюдается наибольшая разориентация мартенситных пластин. В этих участках иногда можно наблюдать межкристаллитные границы в виде сплошных тонких линий, имеющих повышенную травимость, особенно, в нитале.

После закалки от 1100 °С наблюдается равномерная по размеру и не ориентированная дендритная структура аустенита (рис. 1, в), что свидетельствует о завершении кристаллизации стали до начала ускоренного охлаждения отливки. Имеющиеся в этом образце закономерности связи дендритной структуры аустенита с его первичными межкристаллитными границами аналогичны закономерностям, наблюдаемым для образца, закаленного от 1400 °С. Здесь также образуются меж- и внутридендритные границы зерен аустенита, декорированные ориентированными монокристаллами мартенсита (рис. 1, г). Вместе с тем, снижение температуры закалки приводит к тому, что цепочки ориентированных монокристаллов мартенсита начинают чаще формироваться на стыках дендритных ветвей или в прилегающих к ним областях.

В образце, закаленном от температуры 800 °С, при сохранении описанных выше закономерностей связи дендритной и зеренной структуры аустенита в отдельных местах фиксируется начало $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения с образованием пограничных выделений феррита.

Снижение температуры отливок до 750 и 700 °С приводит к увеличению в их структуре немартенситных продуктов распада аустенита, образующихся от меж- и внутридендритных

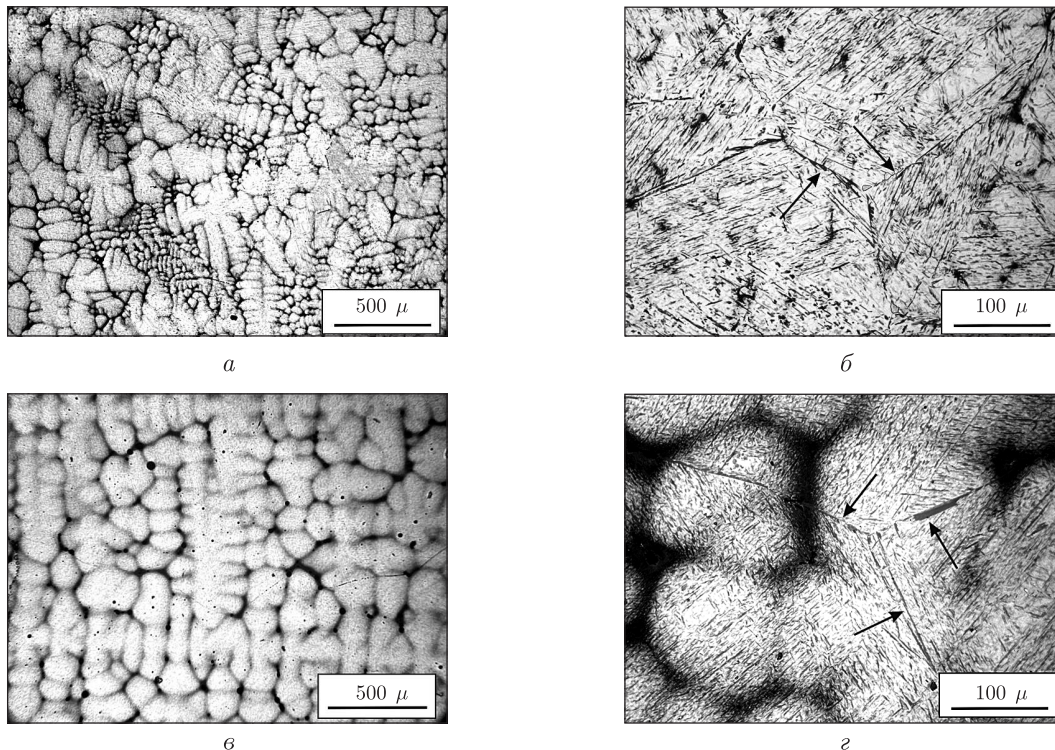


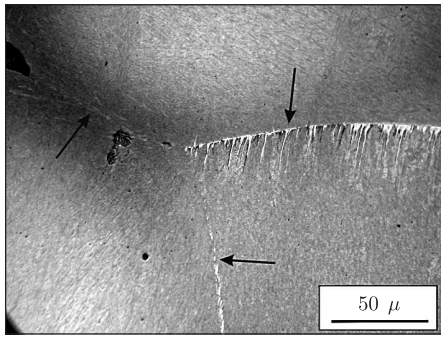
Рис. 1. Структура стали с 0,62% С (травлено пикратом натрия) после кристаллизации и закалки от 1400 °С (а, б) и 1100 °С (в, г); стрелками обозначены границы зерен аустенита

границ, вуалируя их наличие. Это значительно ухудшает выявление дендритной структуры при травлении в пикрате натрия.

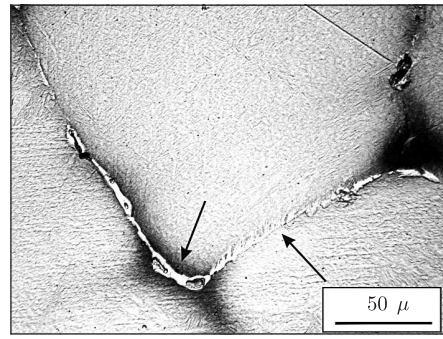
Закалкой от 750 °С по границам первичных аустенитных зерен, наряду с мартенситными кристаллами, фиксируется образование структурно-свободного феррита. Чаще всего встречается идиоморфный феррит, имеющий признаки кристаллографически закономерного образования и выделяющийся на межкристаллитных границах аустенита в виде треугольных островков и (или) ориентированных игл (пластин), распространяющихся в дендритных ветвях от границ и в глубь зерен. Образование феррита с кристаллографически упорядоченным строением наблюдается преимущественно от внутридендритных границ, а также от междендритных границ, расположенных в областях срастания дендритных ветвей, имеющих слабое цветовое окрашивание из-за пониженной ликвации (рис. 2, а). В стыках нескольких дендритных ветвей и прилегающих к ним участках наблюдается повышенная устойчивость аустенита к образованию феррита.

Снижение температуры превращения аустенита до 700 °С приводит к увеличению количества доэвтектоидного феррита идиоморфного строения. В местах срастания нескольких дендритов с максимальной ликвацией и с содержанием неметаллических включений часто наблюдается образование феррита аллотриоморфного строения (рис. 2, б). Фиксируется образование и других продуктов распада аустенита — перлита, бейнита и мартенсита, расположение которых связано с дендритным и первичнозеренным строением аустенита.

На основании результатов выполненных исследований процесс формирования первичного зерна аустенита после кристаллизации сталей с 0,50–0,70% С можно представить следующим образом.

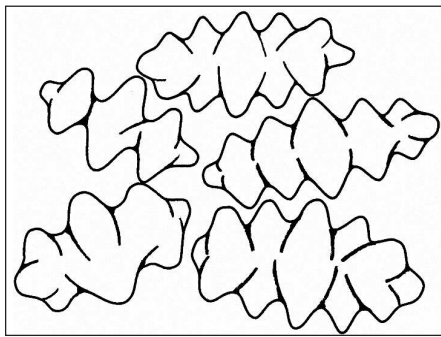


a

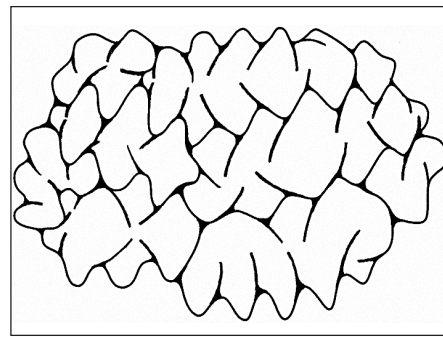


б

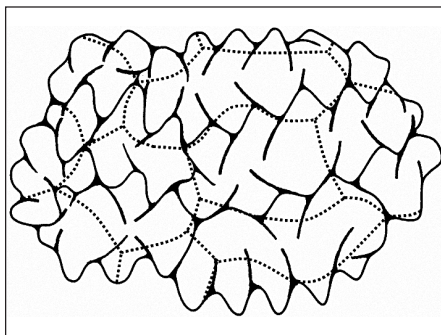
Рис. 2. Структура стали с 0,62% С (травлено пикратом натрия) после кристаллизации и закалки от 750 °С (*a*) и 700 °С (*б*); стрелками обозначены границы зерен аустенита



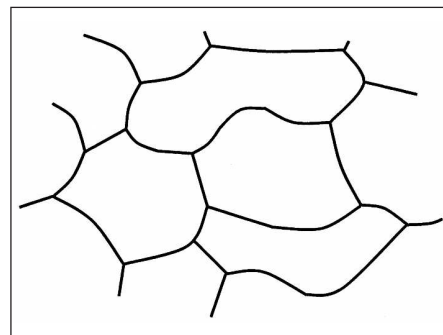
a



б



в



г

Рис. 3. Схема формирования дендритно-зеренной структуры аустенита в углеродистых сталях с 0,50–0,70% С

Дендритная кристаллизация стали завершается срастанием соприкасающихся дендритов аустенита и их ветвей (рис. 3, *a*, *б*), периферия которых вследствие прямой дендритной ликвации имеет повышенную концентрацию примесных элементов (С, Si, Mn и др.). Места срастания дендритов образуют *первичные (междендритные)* границы кристаллитов. Рентгенографические исследования подобных зон срастания в сплавах Fe–Si [4] не обнаруживают разориентировки в этих местах, что свидетельствует о высокой степени их кристаллографического совершенства. Образование *вторичных (внутридендритных)* границ наблюдается ниже температур кристаллизации стали. Расположение вторичных границ,

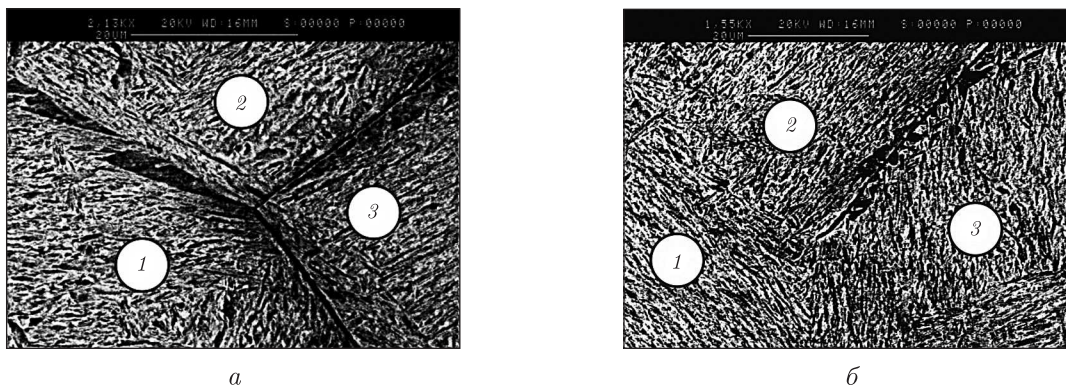


Рис. 4. Структура стали с 0,62% С (травлено ниталем) после кристаллизации и закалки от 1100 °С

обозначенных на рис. 3, в пунктиром, относительно их исходной дендритной структуры имеет произвольный характер.

Ранее было показано [4], что образование вторичных границ в литых металлах и сплавах связано с перераспределением дислокаций и созданием энергетически выгодных их конфигураций по механизму, подобному процессу полигонизации. Образование вторичных границ происходит под действием напряжений, возникающих при охлаждении после кристаллизации. Величина и направление действия этих напряжений определяют скорость и траекторию образования вторичных границ относительно исходной дендритной структуры. По своей сути процесс образования вторичных границ напоминает растрескивание [4]. Разница заключается в том, что величина напряжений, вызывающих микросдвиги атомно-кристаллической решетки и формирование вторичных границ, меньше некоторого критического значения, выше которого происходит образование трещин и разрушение материала.

Причиной появления вторичных границ в исследуемых сталях, по всей вероятности, также являются возникающие при охлаждении термические и фазовые напряжения, приводящие к микропластической деформации путем смещения (сдвига) дислокаций, перераспределяющихся по механизму, подобному полигонизации. Вероятнее всего микропластическая деформация происходит по наиболее плотноупакованным плоскостям $\{111\}$ и направлениям $\langle 110 \rangle$ ГЦК решетки железа, так как сопротивление сдвигу атомов кристаллической решетки аустенита вдоль этих плоскостей и направлений минимально [9]. Образующиеся вторичные границы пересекают дендриты аустенита в произвольных направлениях и, замыкаясь между собой, фрагментируют их в зерна (рис. 3, з).

В сплавах Fe–Si [4] было установлено, что вторичные границы представляют собой дислокационные границы наклона с относительной разориентировкой 15° . По всей вероятности, наблюдаемые в настоящих исследованиях вторичные границы также являются границами дислокационного происхождения и относятся к средне- и большеугловым границам. Подтверждением этого является низкая устойчивость вторичных границ к травлению в нитале, что характерно для границ общего типа, в отличие от междендритных границ, которые часто устойчивы к кислотному травлению.

Некоторые особенности строения вторичных границ в исследуемых сталях были нами выявлены при дополнительных микроструктурных исследованиях с помощью растровой электронной микроскопии (рис. 4). Эти исследования показывают, что вторичные границы иногда являются “оборванными”. Однако из рис. 4 видно, что в местах “обрыва” имеются

стыки нескольких границ, разграничивающих соответствующие им зерна (на рисунке указаны цифрами). На рис. 4, а это: “оборванная” широкая граница между зернами 1 и 3, узкая “оборванная” граница между зернами 2 и 3 и граница между зернами 1 и 2, декорированная цепочкой широких граней мартенситных пластин. Приведенная на рис. 4, б структура иллюстрирует случай, когда травлением в нитале четко выявляется только одна “оборванная” граница между зернами 2 и 3. О наличии границ между участками 1 и 2, 1 и 3 и их принадлежности к соответствующим зернам можно говорить, основываясь на видимом изменении ориентировок пакетов мартенсита. По-видимому, “оборванная” граница между зернами 2 и 3 является высокоэнергетической границей общего типа, а границы между зернами 1 и 2, 1 и 3 относятся к границам с меньшей энергией. Можно предположить, что в дальнейшем при возникновении напряжений вследствие деформационной или термической обработки энергия этих границ повысится и произойдет изменение их структуры, в результате чего будет наблюдаться образование стыка трех высокоэнергетических границ.

Электронно-микроскопическими исследованиями обнаруживаются также вторичные границы с чередующимися участками сильного и слабого травления, что свидетельствует о наличии в одной границе областей разного строения.

Исследования показывают, что строение границ в литой стали определяет тип, морфологию и количество соответствующих продуктов распада аустенита. Так же, как и в работе [4], вторичные границы аустенита оказывают ориентирующее действие к образующимся структурам при его превращениях. В частности, наблюдается влияние вторичных границ, обусловленное, по всей вероятности, их строением, на полиморфное $\gamma \rightarrow \alpha$ превращение железа. Бездиффузионное $\gamma \rightarrow \alpha$ превращение при закалке стали из однофазной γ -области приводит к образованию вдоль вторичных границ аустенита монопластин мартенсита. Закалка стали из двухфазной области $\gamma + \alpha$ фиксирует полиморфное $\gamma \rightarrow \alpha$ превращение с образованием вдоль вторичных границ доэвтектоидного феррита различной морфологии. Для установления закономерностей формирования конечной структуры стали от ее первичного дендритно-зеренного строения аустенита требуется проведение специальных исследований. Сейчас лишь можно констатировать, что такая связь существует, и предположить, что на тип и морфологию продуктов распада аустенита, а также их количество существенное влияние оказывает строение и свойства межкристаллитных границ его первичной дендритно-зеренной структуры.

1. *Сухомлин Г. Д.* Строение и свойства большеугловых специальных внутрифазных и межфазных границ в металлах и сплавах промышленного производства: Автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.02.01 / ПГАСА. – Днепропетровск, 2007. – 36 с.
2. *Унифицированная терминология для границ, вызванных деформацией* // Новости черной металлургии за рубежом. – 2009. – № 2. – С. 83–84.
3. *Мак Линн Д.* Границы зерен в металлах. – Москва: Металлургиздат, 1960. – 322 с.
4. *Мовчан Б. А.* Границы кристаллитов в литых металлах и сплавах. – Киев: Техніка, 1970. – 212 с.
5. *Кайбышев О. А., Валиев Р. З.* Границы зерен и свойства металлов. – Москва: Металлургия, 1987. – 214 с.
6. *Бунин К. П.* Железоуглеродистые сплавы. – Киев; Москва: Машгиз, 1949. – 168 с.
7. *Металлография железа*. Т. III. Кристаллизация и деформация сталей. Пер. с англ. / Под ред. Ф. Н. Тавадзе. – Москва: Металлургия, 1972. – 236 с.
8. *Большаков В. И., Губенко С. И.* Металловедение и термическая обработка металлов. – Днепропетровск: ПГАСА, 2004. – 148 с.
9. *Горелик С. С.* Рекристаллизация металлов и сплавов. – Москва: Металлургия, 1978. – 568 с.

*Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова
НАН Украины, Днепропетровск*

Поступило в редакцию 25.01.2010

Microstructural studies of the primary austenite grain formation after the crystallization of carbon steel containing 0.5–0.7% C

The formation of primary austenite grains in carbon steel containing 0.5–0.7% C after the crystallization is investigated. The connection of primary austenite grains and the initial dendritic structure is established. Two types of intercrystalline boundaries are observed in the structure of cast steel containing 0.5–0.7% C. They are intradendritic ones formed in the coalescence of dendritic branches and interdendritic ones crossing dendrites in random directions.