

PACS numbers: 61.50.Ah, 61.50.Ks, 61.72.Mm, 64.70.kd, 81.30.Hd, 81.30.Kf

Специальные границы в феррите низкоуглеродистых сталей

Г. Д. Сухомлин

*ГВУЗ «Приднепровская государственная академия строительства
и архитектуры»,
ул. Чернышевского, 24-А,
39600 Днепрпетровск, Украина*

Методами световой металлографии установлено наличие низкоэнергетических границ в феррите доэвтектоидных сталей и предложена методология их определения. Полученные результаты подтверждены и дополнены методом растровой электронной микроскопии с дифракцией обратно рассеянных электронов. Показано, что увеличение доли таких границ при температурно-деформационных обработках повышает комплекс физико-механических свойств сталей.

Металлографічними методами встановлено наявність низкоенергетичних меж у фериті доевтектоїдних сталей і запропоновано методологію їх визначення. Одержані результати підтверджено та доповнено методом растрової електронної мікроскопії з дифракцією зворотно розсіяних електронів. Показано, що збільшення частки таких меж при температурно-деформаційних обробках підвищує комплекс фізико-механічних властивостей сталей.

The metallography methods are used to reveal the presence of low-energy boundaries in hypoeutectoid-steels' ferrite, and methodology of these boundaries' determination is proposed. The obtained results are confirmed and completed by scanning electron microscopy with electron backscattering diffraction (EBSD). As shown, the increase of content of such boundaries at temperature–deformation treatments enhances the complex of mechanical properties of steels.

Ключевые слова: специальные границы, феррит, решётка совпадающих узлов, низкоуглеродистые низколегированные стали, металлография, растровая электронная микроскопия.

(Получено 11 июня 2013 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

Описание атомной структуры границ зёрен, основанное на концепции решёток совпадающих узлов (РСУ), позволяет оценить структуру, свойства и поведение большеугловых границ в различных поликристаллических материалах. Границы с особыми свойствами, например, пониженной поверхностной энергией, слабым линейным натяжением, малой подвижностью при высоких температурах и другими, относят к специальным [1–5]. Они присутствуют в различных материалах, например, в золоте [6], меди [7], сплавах на никелевой основе [8], алюминии и его сплавах [9] и многих других. Показано, что специальные границы наблюдаются преимущественно в металлах и сплавах с ГЦК-решеткой. В работах [10–13] было установлено существование специальных границ типа $\Sigma = 3^n$, а также множественных (более трёх границ) стыков и множественных (более четырёх стыков) узлов в аустенитных хромоникелевых нержавеющей сталях. Свойства и количество множественных стыков и узлов в зернограничной структуре прямо зависят от свойств и количества специальных границ типа $\Sigma = 3^n$.

Исследования структуры и свойств специальных границ проведены в основном на сверхчистых или модельных металлах и сплавах. В металлах и сплавах с ОЦК-решёткой, которые обладают сравнительно высокой энергией дефектов упаковки, специальные границы наблюдаются редко.

Данных, касающихся металлов и сплавов широкого применения, мало, что затрудняет использование знаний о специальных границах зёрен при разработке перспективных промышленных технологий производства металлопродукции с требуемым комплексом физико-механических свойств.

Вместе с тем есть сведения [14, 15], что низкоэнергетические границы формируются не только в ГЦК-материалах, но и в мартенситных и бейнитных структурах низкоуглеродистых сталей с ОЦК-решёткой. Возникновение специальных разориентаций связывают с зарождением и ростом мартенситных кристаллов в соответствии с ориентационным соотношением Курдюмова–Закса (ОС К–З) [16]. При этом между рейками в пакете закономерных ориентаций наблюдаются специальные границы с обратной плотностью совпадающих узлов $\Sigma = 9, 11, 33$ и 129 [14].

Сведения о существовании специальных границ в ОЦК-решётке отожжённого или рекристаллизованного железа отсутствуют, хотя в работе [17], посвящённой выделению карбидов по границам зёрен в холоднодеформированных, а затем отожжённых сплавах Fe–7% Ni, Fe–1% V, Fe–5% Mo, найдены три границы, близкие к $\Sigma = 3$ (в 2° от неё) и 3 границы, близкие к $\Sigma = 9$ и $\Sigma = 11$. Малое количество специальных границ в нелегированном α -железе, а также алюми-

нии, хром и некоторых других материалах часто объясняют высокими значениями энергии дефекта упаковки и сравнительно высокой удельной поверхностной энергией внутрифазных границ [3–5]. Вместе с тем, прямо связывать возникновение специальных границ только с величиной энергии дефекта упаковки не совсем обосновано, поскольку они наблюдаются также в некоторых металлах и сплавах со сравнительно высокой энергией дефектов упаковки.

В литературе мало данных о существовании специальных границ в ферритной составляющей низкоуглеродистых сталей, образующейся при рекристаллизации и отжиге, при росте зёрен или распаде аустенита с образованием продуктов перлитного семейства. Вместе с тем, при диффузионном зарождении и росте зародышей с ОЦК-решёткой при распаде высокотемпературной ГЦК-фазы в сплаве никель–хром [18] соблюдается ориентационное соотношение Курдюмова–Закса [16]. Это позволяет предположить наличие аналогичных кристаллографических связей и при диффузионном превращении $\gamma \rightarrow \alpha$, вследствие чего в одном аустенитном зерне можно ожидать образование межферритных специальных границ между разными вариантами ОС К–З.

В настоящей работе была поставлена цель — показать методами световой и электронной микроскопии наличие в феррите низкоуглеродистых сталей специальных границ РСУ и дать оценку их энергетических уровней.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалом исследования служили малоуглеродистые стали в состоянии после горячей прокатки (сталь 20), а также после горячей прокатки и нормализации с отдельного нагрева (сталь 06Х1).

Кроме световой микроскопии для изучения кристаллографических и морфологических параметров границ зерен чаще всего используются следующие методы (в основном дифракционные) определения ориентации кристаллов:

- а) полевая ионная микроскопия,
- б) просвечивающая электронная микроскопия и микродифракция,
- в) атомно-силовая микроскопия,
- г) дифракция обратно рассеянных электронов (ДОРЭ), (англ. EBSD),
- д) рентгеновская дифракция.

Каждый из указанных методов имеет свои области преимущественного применения, которые определяются их методическими и приборными особенностями. Методы *а*, *б*, *в* обладают высокой локальностью и разрешающей способностью и вытекающей из неё низкой скоростью набора данных. Наиболее современный метод

ДОРЭ по своим возможностям занимает промежуточное положение между оптической световой и просвечивающей электронной микроскопией.

В настоящей работе основными методами исследования были световая, а также растровая электронная микроскопия в комплексе с ДОРЭ, которые дополняют друг друга.

Световая микроскопия не позволяет получить однозначные количественные данные о кристаллографических параметрах решёток двух контактирующих зёрен, за исключением некоторых случаев, когда возможно наблюдение за огранкой ямок травления, морфологических особенностей двойниковых или малоугловых границ. В работе [14] использован метод определения таких характеристик, как величина поверхностной энергии, обратная плотность совпадающих узлов Σ границ зёрен в ГЦК-поликристаллах коррозионностойкой стали, меди и др., который основан на использовании характерного вида границ двойников отжига семейства $\Sigma = 3^n$. Аналогичным методом получены достоверные данные, касающиеся структуры границ феррита низкоуглеродистых сталей [24].

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Реальные конфигурации зёрненной структуры сталей существенно отличаются от ожидаемых, построенных по существующим теоретически моделям. Например, на рис. 1, *a* показана структура, полученная путём компьютерного моделирования процесса рекристаллизации [19], основанная на предположении, что все большеугловые границы имеют примерно одинаковую удельную поверхностную энергию σ , а в тройных стыках выполняется условие рав-

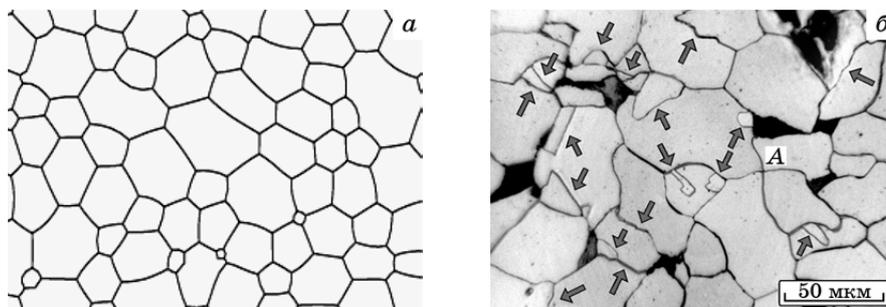


Рис. 1. Типичная структура рекристаллизованного феррита: по данным компьютерного моделирования [19] с введением условия равновесия в тройных стыках по Херрингу (*a*); реальная зёрненная структура горячекатаной стали 06X1 (*б*).

новесия по Херрингу [20]. Для сравнения на рис. 1, б приведена реальная зёрнистая структура стали 06X1 после горячей прокатки и охлаждения на воздухе со скоростью $0,5^\circ\text{C}/\text{с}$. Ее основной отличительной особенностью от модельной является наличие фасетированных специальных границ (отмечены стрелками) и неравновесных углов в тройных стыках.

Зернограничные структуры в феррите представляют собой ансамбли с участием специальных низкоэнергетических границ, отличающихся от границ общего типа наличием зигзагообразных фасеток, пониженной травимостью, резкими изломами под острыми углами и некоторыми другими признаками. Сочетание или чёткое проявление одного или двух из таких конфигурационных (морфологических) признаков с высокой степенью вероятности указывает на принадлежность границы к низкоэнергетическим (специальным).

Типичный случай специальной взаимной ориентации зерен в феррите приведен на рис. 2, а, где граница А–В содержит фасетки двух типов, объединенные в группы: первая группа 1–2–3–4–5, а вторая группа состоит из четырех горизонтальных фасеток, причём в каждой группе фасетки параллельны друг другу.

Это прямо свидетельствует о зависимости энергии этой границы от пространственной ориентации относительно решетки совпадающих узлов. Кроме того, в тройных стыках А и В углы между противолежащими границами составляют почти 180° , что указывает на очень низкую удельную поверхностную энергию границы А–В.

Другой типичный случай зафиксирован на рис. 2, б, где граница А–В между зёрнами 1 и 2 имеет конфигурацию, типичную для двойников отжига в материалах с ГЦК-решёткой [3–6, 12]. Она характеризуется тем, что наиболее протяжённые её участки 1–2 параллельны друг другу, а само зерно 2 имеет вытянутую форму и примыкает к зерну 3 короткой стороной.

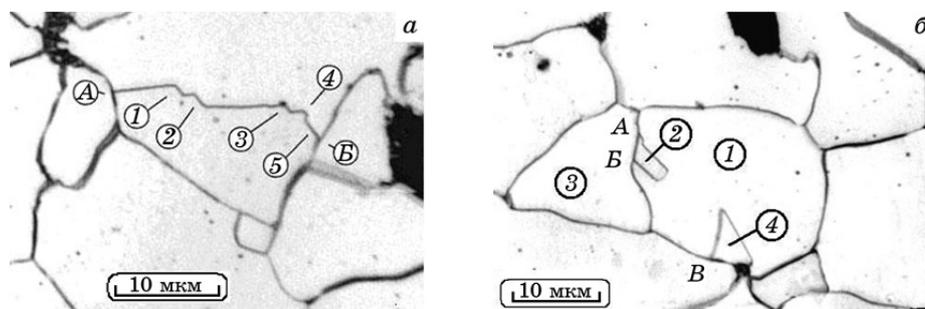


Рис. 2. Специальные границы в ферритной составляющей доэвтектоидных сталей 06X1 (а) и 20 (б): а — фасетки (1–5) под тупыми углами на специальной границе; б — границы 1–2 и 1–4 специальные, $\Sigma = 3$ — «висячие» двойники отжига.

Граница между зёрнами 1 и 4 также принадлежит к специальным, так как состоит из двух фасеток, расположенных под острым углом друг к другу, а в стыке *B* угол между противоположными ей границами $\cong 179^\circ$. Такие границы в концепции РСУ относятся к специальным с обратной плотностью совпадающих узлов $\Sigma = 3$. Подобные зёрна в меди и других ГЦК-материалах называют «висячими» двойниками отжига.

Обращает на себя внимание то, что в тройных стыках 1–2–3 и 1–3–2 (рис. 2, б) оба сегмента границы 1–2 не оказывают значительного натяжения: противоположные им углы равны почти 180° , что прямо свидетельствует о низкой удельной поверхностной энергии указанной границы. Величину этой энергии можно определить из уравнения Херринга [20], которое описывает равновесие сил поверхностного натяжения γ и вращающих моментов в стыке трёх границ:

$$\sum_{i=1}^3 [\gamma_i \sigma_i + (\sigma_i \mathbf{xz})(\partial \gamma_i / \partial \theta_i)] = 0,$$

где γ_i и σ_i — величины поверхностного натяжения и удельной энергии границ соответственно, а компоненты $\partial \gamma_i / \partial \theta_i$ учитывают зависимость поверхностной энергии i -й границы от ориентации её плоскости залегания.

Компоненту $\partial \gamma_i / \partial \theta$ обычно называют вращающим моментом границы, если её энергия зависит от положения решеток двух соседних зерен. Как правило, для произвольных границ общего типа эта компонента принимается равной нулю, и в этом случае для определения удельной поверхностной энергии пользуются уравнением Юнга [21]:

$$\frac{\sigma_1}{\sin \alpha_1} = \frac{\sigma_2}{\sin \alpha_2} = \frac{\sigma_3}{\sin \alpha_3}.$$

В соответствии с формулой Юнга, энергия σ_1 границы 1–2 составляет около 70 эрг/см^2 , поскольку измеренный угол α_1 равен 175° , а поверхностная энергия границ общего типа в железе по данным [5] равна 780 эрг/см^2 . Таким образом, наблюдаемая граница 1–2 (рис. 2, б) в терминах РСУ относится к специальным с обратной плотностью совпадающих узлов $\Sigma = 3$. Если вновь возвратиться к границе *A–B* на рис. 2, а, то можно видеть, что фасетка 1 реагирует с большеугловой границей общего типа в стыке *A* таким образом, что образовавшийся угол равен $(177 \pm 2)^\circ$. Отсюда удельная энергия двойниковой границы $\Sigma = 3$ равна 40 эрг/см^2 . Эта величина является достаточно достоверной, так как средняя величина угла, полученная из 17 измерений, составила $(176 \pm 2)^\circ$, что соответствует $(55 \pm 15) \text{ эрг/см}^2$. Полученный результат отличается от данных, приве-

денных в работе [5], где величина удельной энергии двойниковой границы составляет 190 эрг/см^2 , т.е. почти в 4 раза больше.

Характерным признаком наличия специальных границ и связанных с ними свойств в ГЦК-металлах являются четверные и другие множественные стыки. На плоских сечениях зернограницных структур они обычно не наблюдаются, так как теоретически точечные контакты четырёх кристаллов, возникающие в процессе роста зёрен, в момент образования (свитчинг, рис. 3, *a-z*) распадаются на два тройных [4, 5, 22, 23].

Однако в работах [11–14] показано, что линейные дефекты, вдоль которых контактируют четыре и более границы, могут быть стабильны, если одна или несколько границ, формирующих стык, являются специальными, обладающими значительными вращающими моментами [11].

На рисунке 4, *a* представлен ансамбль границ в феррито-перлитной структуре стали 06X1, где зёрна обозначены цифрами, а стыки — буквами. Можно видеть, что зёрна 1, 2, 3 и 4 имеют общую точку *A* — четверной стык, который содержит, по крайней мере, две специальные границы. А именно, у границы 1–2 противолежащий угол в стыке 1–2–4 близок к 180° , а граница 2–4 относится к $\Sigma = 3$, так как содержит протяжённые, чётко выраженные фасетки. Таким образом, даже если две другие границы (1–3 и 3–4) — общего типа, стык *A* является устойчивым линейным образованием, вдоль которого контактируют зёрна 1, 2, 3, 4.

Рядом расположен ещё один четверной стык *B*, который является общей линией пресечения входящих в него четырёх границ, из которых 4–5, 5–6, 6–7 являются специальными (по фасеткам и углам), поэтому и граница 4–7 также является специальной, поскольку все четыре границы принадлежат к семейству $\Sigma = 3^n$, а сам стык принадлежит к типу $4d$ по классификации, предложенной в [11]. В этом же ансамбле в точке *B* находится третий четверной стык, вдоль которого контактируют зёрна 8–9–10–11. Анализ по-

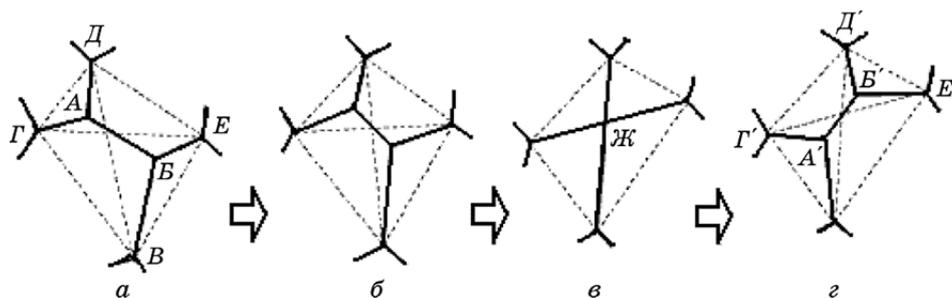


Рис. 3. Схема образования и расщепления (свитчинг) виртуального четверного стыка [23].

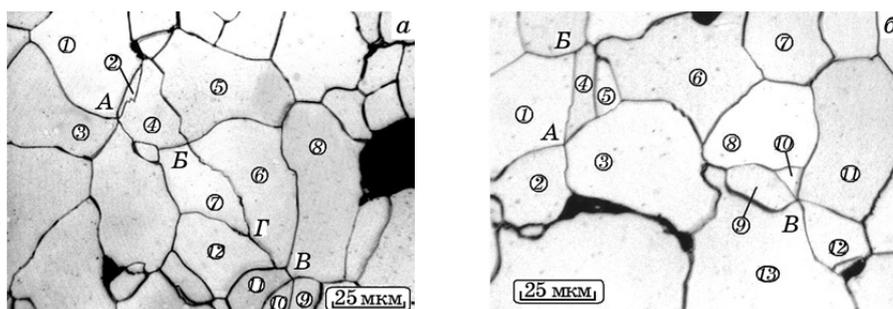


Рис. 4. Специальные границы и множественные стыки в доэвтектоидном феррите: сталь 06X1 (а); сталь 20 (б).

казал, что к специальным можно отнести границы 9–10 и 10–11, т.е. стык В относится к типу 4b.

Подобные стыки наблюдаются и в других сталях. На рисунке 4, б показан фрагмент структуры горячекатаной стали 20, где между ферритными зёрнами 1–4, 4–5, 5–6, 3–6, 6–8, 8–10, 9–13 и др. сформировались специальные низкоэнергетические границы, а в точке А — четверной стык. Условия существования такого стыка выполняются, так как граница 1–4 специальная, противолежащий ей угол в стыке В $\cong 176^\circ$ и она относится к $\Sigma = 3$, а граница 2–3 содержит фасетки и тоже относится к специальным. В точке В контактируют пять зёрен: 9, 10, 11, 12 и 13. Это значит, что стык относится к типу 5d, а все границы, входящие в него, принадлежат к семейству $\Sigma = 3^n$.

Таким образом, для обнаружения и подсчета специальных границ методом световой микроскопии в металлах с ОЦК-решеткой, в том числе и в феррите низкоуглеродистых сталей, разработаны и рекомендуются для использования идентификационные признаки [24], которые указывают на пониженную удельную поверхностную энергию границ [11–13] (см. рис. 2, а, б и 4, а, б), что позволяет с высокой степенью вероятности отнести их к специальным.

Таковыми признаками являются:

- наличие фасеток (резких изломов следа границы) под острыми или тупыми углами, которые всегда указывают на то, что граница обладает ориентационной чувствительностью, т.е. вращающим моментом (рис. 2, а, граница АВ, рис. 4, а, границы 2–4 и 4–5);
- существование в одной границе 2–3 групп фасеток с одинаковой направленностью и степенью травимости в каждой группе свидетельствует о принадлежности такой границы к специальным типа $\Sigma = 3$ (рис. 2, а, граница АВ);
- если два сегмента границы параллельны друг другу и образуют сравнительно узкую прослойку, а их контакты в двух стыках имеют противолежащие углы, равные почти 180° , то она относится к

специальным, к типу $\Sigma = 3$ (рис. 2, б, «висячий» двойник отжига, граница 1–2);

– граница является специальной, если она входит в тройной стык, в котором две другие границы уже определены как специальные (рис. 4, б, $8-10_{\text{спец}} + 9-10_{\text{спец}} \rightarrow 8-9_{\text{спец}}$);

– если один или оба конца границы (рис. 4, б) входят в четверной стык, уже содержащий три специальные границы;

– если граница одним концом входит в четверной или пятерной стык, а вторым концом — в тройной с образованием противоположащего угла, близкого к 180° (рис. 4, б, граница 1–4).

На рисунке 5 приведен пример анализа методом секущих зерно-границной структуры феррита горячедеформированной стали 20. Здесь темными полями являются колонии перлита, пересечение с границами которых не включается в учётные данные.

Относительное количество специальных границ $\lambda_{\text{спец}}$ представляет собой отношение удельной площади специальных границ ($\Sigma l_{i(\text{спец})}$) к удельной площади всех границ в единице объёма ($\Sigma l_{i(\text{общ})} + \Sigma l_{i(\text{спец})}$), поэтому принято

$$\lambda_{\text{спец}} = \frac{\sum l_{i(\text{спец})}}{\sum l_{i(\text{общ})} + \sum l_{i(\text{спец})}}.$$

Для определения Σl_i длину l_i каждой пересекаемой границы измеряли без учёта её кривизны, а в случае специальных границ оценивали суммарную длину фасеток. Это позволяет повысить точность измерений при небольшом числе таких границ. Если ограничиться подсчётом только точек пересечений, то следует существенно повысить количество измерений.

Анализ отрезка секущей на рис 5, б показал, что границы с номерами пересечений 1, 3, 5 относятся к специальным, поскольку обладают перечисленными выше признаками и в этом конкретном

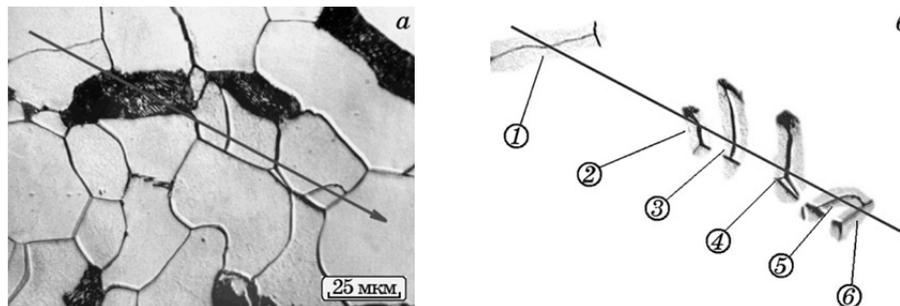


Рис. 5. Определение количества специальных границ в стали 20: пример расположения измерительной секущей линии (а); схема выбора и анализа границ вдоль секущей (б).

случае соотношение между специальными и обычными границами составляет $\approx 55\%$ (границы перлит–феррит не учитываются).

Подсчет относительного количества специальных границ в ферритной составляющей в горячедеформированных трубах из стали 06Х1 дал отношение специальных границ к общему их количеству $\lambda_{\text{спец}} = 0,12-0,19$.

Второй использованный в работе метод электронной растровой микроскопии с ДОРЭ-анализом основан на скоростном компьютерном анализе картин каналирования — Кикучи-линий — дифракционных отражений, взаимное расположение которых определяет ориентацию оси зоны отражающих плоскостей кристалла относительно нормали к поверхности шлифа [25].

Исследование проведено на растровом электронном микроскопе Zeiss EVO-50 фирмы «Karl Zeiss», укомплектованном детектором ДОРЭ фирмы «Oxford Instruments».

Исследования проводили при ускоряющем напряжении источника электронов 20 кэВ, токе зонда 1 нА. Наклон образца относительно исходного пучка электронов составлял 70° . Для однозначного индексирования линий дифракции проводили интегрирование по трем дифракционным картинам линий Кикучи.

Эта методика в сочетании с высокоскоростной программой машинной обработки электронограмм позволяет за короткий промежуток времени проанализировать и оценить большие массивы данных, однако точность определения углов и осей разориентации при этом не всегда высока, что связано как с ограниченными возможностями дифракции на отражение, так и с большой чувствительностью метода к качеству поверхности образца и параметрам настройки программного обеспечения.

Полученные данные об ориентации зерен обрабатывали с помощью пакета программ «HKL Channel 5». Пример такой обработки в виде карты ориентационных изображений показан на рис. 6, а, а на

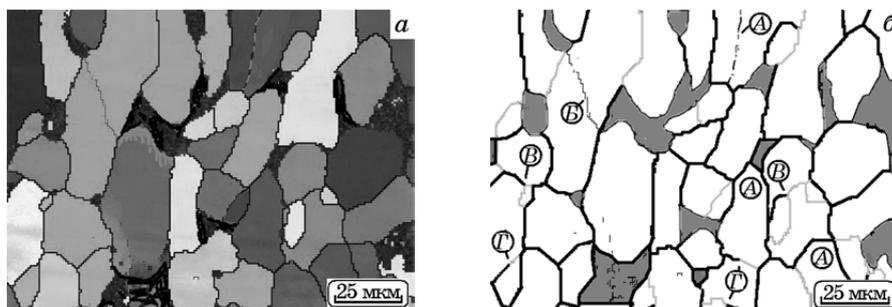


Рис. 6. Распределение специальных границ и перлитных колоний в стали 20, полученное методом дифракции отражённых электронов (обозначения см. в тексте).

рис. 6, б приведено распределение произвольных границ (чёрные линии) и перлитных колоний (серого цвета), а также расположение специальных границ (серые линии) с различными показателями обратной плотности совпадающих узлов Σ .

На рисунке 6, б отмечены четверные стыки (А), содержащие одну или несколько специальных границ. Их присутствие тормозит перемещение окружающих их сегментов зернограницной сети и сдерживает рост зёрен при высоких температурах [12].

Отметим некоторые возможные нарушения в работе программы, обрабатывающей дифракционные данные, полученные методом ДОРЭ. Например, символами В (рис. 6, б) отмечены тройные стыки, в которых взаимодействуют две специальные и одна произвольная граница общего типа. Такое сочетание противоречит теоретическим представлениям о взаимодействии трёх кристаллов вдоль стыка. Очевидно, что если в стыке контактируют две специальные границы Σm и Σn , то на основе матричных уравнений можно показать, что третьей границей в стыке будет специальная с показателем $\Sigma(m \times n^{\pm 1})$. Отметим также граничные случаи (Г, рис. 6, б), когда программа одну и ту же границу учитывает на разных участках то как специальную, то как общего типа. Этот артефакт возникает из-за допустимого интервала отклонений специальных углов от теоретических номиналов по Брендону [26]. Подобные сомнительные случаи следует дополнительно оценивать аналитическим путём с помощью морфологических признаков, повышая тем самым надёжность и достоверность получаемых сведений о составе границ в конкретном образце.

Установлено также, что количество специальных границ в феррите стали 06Х1 зависит от ее температурно-деформационной обработки. В горячекатаной стали 06Х1 $\lambda_{\text{спец}} = 0,12-0,19$, а после ее нормализации $\lambda_{\text{спец}} = 0,24-0,26$.

На основании ранее проведенных исследований [27], где было показано определяющее влияние специальных низкоэнергетических границ на стойкость высоколегированных сталей к межкристаллитной и питтинговой коррозии, можно полагать, что кажущееся небольшое количество специальных границ в феррито-перлитных сталях может изменяться в значительных пределах в зависимости от технологии производства металлопродукции и также оказывать существенное влияние на структуру и свойства металла готовых изделий.

Обобщая полученные результаты, можно заключить, что как металлографический метод, так и ДОРЭ-анализ, имеют некоторые ограничения, поэтому для исключения ошибок при количественном и качественном анализе и интерпретации плоских сечений зернограницных структур, необходимо комплексное применение двух и более методик.

Для изыскания способов влияния на количество специальных границ в ферритной составляющей феррито-перлитных сталей необходимы дальнейшие комплексные исследования, включающие изготовление образцов металлопродукции по различным технологическим вариантам с последующим изучением их структуры, коррозионных и механических свойств, с анализом статистических данных полученных дополняющими друг друга методами.

4. ВЫВОДЫ

1. На основании исследований методом световой микроскопии установлено наличие специальных низкоэнергетических границ в зернограничной структуре феррита малоуглеродистых сталей и описаны их типичные конфигурации.
2. Разработаны и рассмотрены основные идентификационные признаки, указывающие на принадлежность той или иной границы в ферритной составляющей к специальным, обладающим пониженной удельной поверхностной энергией.
3. Проведена оценка относительного количества специальных границ в ферритной составляющей в структуре горячедеформированных труб из сталей 20 и 06Х1 и показано, что в зависимости от режима температурно-деформационной обработки соотношение специальных границ к общему количеству колеблется в пределах $\lambda_{\text{спец}} = 0,12-0,26$ (12–26%).
4. Показано, что электронная растровая микроскопия с анализом дифракции обратно рассеянных электронов позволяет достаточно корректно оценить количество специальных границ в большом массиве зерен феррита в структуре сталей, дополняя данные световой микроскопии.
5. Показана возможность управления свойствами металлопродукции из феррито-перлитных сталей при разработке прогрессивных технологических процессов с использованием зернограничного конструирования, основанного на повышении доли специальных низкоэнергетических границ в их структуре.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. В. М. Косевич, В. М. Иевлев, Л. С. Палатник, А. И. Федоренко, *Структура межкристаллитных и межфазных границ* (Москва: Металлургия: 1980).
2. Д. Мак Лин, *Границы зерен в металлах* (Москва: Металлургиздат: 1960).
3. L. E. Murr, *Interfacial Phenomena in Metals and Alloys* (New York: Addison-Wesley Publ. Company: 1975).
4. Ч. В. Копецкий, А. Н. Орлов, Л. К. Фионова, *Границы зерен в чистых материалах* (Москва: Наука: 1987).
5. А. Н. Орлов, В. Н. Перевезенцев, В. В. Рыбин, *Границы зерен в металлах*

- (Москва: Металлургия: 1980).
6. J. T. McGinn, V. A. Greenhut, T. Tsakalakos, and J. Blanc, *Acta Metall.*, **30**, No. 12: 2103 (1982).
 7. G. Herman, H. Gleiter, and G. Bäro, *Acta Metall.*, **24**, No. 5: 353 (1976).
 8. T. Watanabe, *Res. Mechanica*, **11**, No. 1: 47 (1984).
 9. M. Eddahbi, C. B. Thomson, F. Carreco, and O. A. Ruano, *Mater. Sci. Eng. A*, **284**, No. 1: 292 (2000).
 10. Г. Д. Сухомлин, *Физ. мет. металловед.*, **54**, № 1: 192 (1982).
 11. Г. Д. Сухомлин, *Физ. мет. металловед.*, **54**, № 2: 402 (1982).
 12. G. D. Sukhomlin and A. V. Andreeva, *physica status solidi (a)*, **78**, Iss. 1: 333 (1983).
 13. Ч. В. Копецкий, А. В. Андреева, Г. Д. Сухомлин, *Физ. мет. металловед.*, **6**, № 2: 349 (1986).
 14. В. И. Большаков, Г. Д. Сухомлин, Д. В. Лаухини, *Металознавство та термічна обробка металів*, **35**, № 4: 5 (2006).
 15. В. И. Большаков, Г. Д. Сухомлин и др., *Сб. научных трудов «Строительство, материаловедение, машиностроение»*, **26**, № 1: 191 (2004).
 16. G. V. Kurdumov and G. Sachs, *Z. Phys.*, **64**, No. 9: 325 (1930).
 17. S. Lartigue and L. Priester, *Acta Metall.*, **31**, Iss. 11: 1809 (1983).
 18. C. P. Luo and G. C. Weatherly, *Acta Metall.*, **37**, Iss. 3: 791 (1989).
 19. K. Barmak, J. Kim, K.-S. Kim et al., *Scr. Mater.*, **54**, Iss. 6: 1059 (2006).
 20. C. Herring, *Physics of Powder Metallurgy* (New York: McGraw-Hill Book Co.: 1951).
 21. T. Young, *Philos. Trans. R. Soc. London*, **95**, No. 4: 65 (1805).
 22. К. С. Чернявский, *Стереология в металловедении* (Москва: Мир: 1977).
 23. F. N. Rhines, K. R. Craig, and R. T. DeHoff, *Metall. Trans.*, **5**, No. 2: 413 (1974).
 24. V. Bolshakov, G. Sukhomlin, D. Laukhin et al., *Theoretical Foundations of Civil Engineering* (Warszawa: Polit. Warsh.: 2007).
 25. A. J. Schwartz, M. Kumar, B. L. Adams, and D. P. Field, *Electron Backscattered Diffraction in Materials Science. 2nd ed.* (New York: Springer Science and Business Media: 2009).
 26. D. G. Brandon, *Acta Metall.*, **14**, No. 11: 1479 (1966).
 27. Г. Д. Сухомлин, Т. А. Дергач, *Металлургическая и горнорудная промышленность*, № 6: 50 (2008).