

А.М.Нестеренко, Т.В.Грицай

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ЦИКЛИЧЕСКОЙ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ ФЕРРИТА В ГОРЯЧЕКАТАНОЙ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ ЛИСТОВОЙ СТАЛИ

Целью работы является исследование циклической рекристаллизации феррита в горячекатаном прокате с исходно неравномерной структурой и текстурой по сечению. Установлено, что наряду с наследственным влиянием структурно-текстурной неоднородности важным фактором, инициирующим развитие циклической рекристаллизации при отжиге в горячекатаном листовом прокате из низкоуглеродистой стали, является повторяющиеся процессы образования и растворения карбидных и сульфидных предвыделений и микрочастиц.

низкоуглеродистая сталь, горячекатаный прокат, неравномерная структура и текстура, отжиг, циклическая рекристаллизация, карбиды, сульфиды

Введение. Известно [1], что прокатка полос из низкоуглеродистых сталей на непрерывных широкополосных станах горячей прокатки (НШСГП) с окончанием прокатки при температуре ниже точки A_{r3} (в частности, в межкритическом интервале температур – МКИТ: $A_{r1} < T_{\text{КП}} < A_{r3}$) приводит к выраженной разнотекстурности структуры феррита и существенно различающейся текстуре по их сечению. Установившееся различие структуры и текстуры по сечению горячекатаных полос из низкоуглеродистых сталей при операциях рекристаллизационного отжига даже с длительными выдержками в МКИТ (несколько выше A_{r1}) или в субкритическом интервале температур (СКИТ – ниже A_{r1}), как правило, не устраняется [1,2]. В [2] показано, что в горячекатаном тонколистовом (1,5мм) прокате из низкоуглеродистой стали 08пс с различающимися по сечению параметрами текстуры и ферритной структуры рекристаллизация в процессе отжига при температуре 680°C (СКИТ) осуществляется с неоднократным повторным полным перетрансформированием исходной неравномерной ферритной структуры в равномерную и наоборот, что позволяет классифицировать ее как циклическую. Теоретические аспекты, определяющие особенности развития циклической рекристаллизации в низкоуглеродистых листовых сталях исследуются впервые, а в практическом плане проблема обеспечения равномерности ферритной структуры и текстуры по сечению проката, в особенности для холодной штамповки, представляется важной. Поэтому проведение исследований в этом направлении является актуальным.

Состояние вопроса. Согласно известным положениям [3,4] и результатам исследований, приведенным в [1,2], ускоренный рост зерен феррита в поверхностной зоне горячекатаного проката из низколегированной стали, полученного на НШСГП с окончанием прокатки при температуре

МКИТ ($A_{r1} < T_{\text{КП}} < A_{r3}$), в ходе отжига при температуре 680°C может обуславливаться следующими причинами:

- прямым наследованием рекристаллизованной ферритной структурой образовавшихся при горячей тонколистовой прокатке в поверхностной и средней зонах образцов выраженных текстур разного типа, соответственно, $\langle 110 \rangle$ и $\langle 100 \rangle$;

- наличием в поверхностных слоях специальных высокоподвижных границ полигонального типа с низкой плотностью дефектов между «старыми» и «новыми» зёрнами феррита при вторичной рекристаллизации, ориентация между которыми отвечает соотношениям Кронберга – Вильсона;

- наиболее низким уровнем поверхностной энергии плоскостей $\{110\}$ ОЦК решетки феррита в сравнении с другими низкоиндексными ее плоскостями $\{111\}$ и $\{100\}$ ($\sigma_{\{110\}} = 1,3 \cdot 10^{-4}$ Дж/см² против $\sigma_{\{111\}} = 1,5 \cdot 10^{-4}$ и $\sigma_{\{100\}} = 1,6 \cdot 10^{-4}$ Дж/см²).

Указанные причины не дают ответа на вопрос о возможных движущих силах развития циклической рекристаллизации феррита в горячекатаном прокате с исходно неравномерной структурой и текстурой по сечению.

Методика проведения исследования. Исследовали горячекатаный прокат толщиной 1,5 и 2,05 мм из стали 08пс, произведенный на НШСП 1680 ОАО «Запорожсталь». Для исследований были отобраны концевые участки полос, $T_{\text{КП}}$ которых были понижены до уровня $750 - 760^{\circ}\text{C}$. Вырезанные из этих полос образцы размерами 1,5x50x300 мм и 2,05x50x300 мм по определенным температурно–деформационным режимам прокатывали на лабораторном стане дуо 280 (исследования проведены к.т.н. С.А.Воробьем). Температура нагрева под прокатку для всех режимов составляла 1000°C . Подстуживание образцов размером 1,5x50x300 мм перед прокаткой осуществляли таким образом, чтобы обеспечивалась реализация двух $T_{\text{КП}} = 750$ и 700°C , соответствующих аустенитно–ферритной (МКИТ) и ферритной (СКИТ) областям прокатки. Обжатие при горячей прокатке образцов этого типоразмера на конечную толщину 1,3 мм $\varepsilon = 13,3\%$. Образцы другого типоразмера 2,05x50x300 мм подвергали двойной горячей прокатке с $T_{\text{КП}} = 650^{\circ}\text{C}$ (СКИТ) на конечную толщину 1,5 мм. Суммарное обжатие составило при этом $\varepsilon = 26,8\%$. С целью имитации температурных условий, близких для полос после их смотки в рулоны, охлаждение образцов после прокатки осуществляли в муфельной печи, исходная температура которой составляла 600°C . Рекристаллизационный отжиг образцов проката с указанными $T_{\text{КП}}$ проводили при температуре 680°C с длительностями выдержек 10, 20, 30, 40 мин, 1, 2, 3, 4, 5, 6 час.

Изложение основных материалов исследования. При исследовании зависимости зеренной структуры феррита по сечению в образцах исследованного проката от длительности выдержки при отжиге установлено, что циклический характер ее изменения в процессе рекристаллизации на-

блюдается как в образцах исходного горячекатаного проката, так и в образцах обоих типоразмеров после одинарной и двойной лабораторной горячей прокатки по режимам с указанными $T_{КП}$. В частности, приведенные на рис.1 зависимости достаточно хорошо отражают циклический характер изменения среднего размера зерна феррита в исходном горячекатаном листовом прокате из исследованной стали 08пс толщиной 2,05мм и в конечном прокате толщиной 1,5мм после двойной лабораторной горячей прокатки в процессе развития рекристаллизации при температуре отжига 680°C.

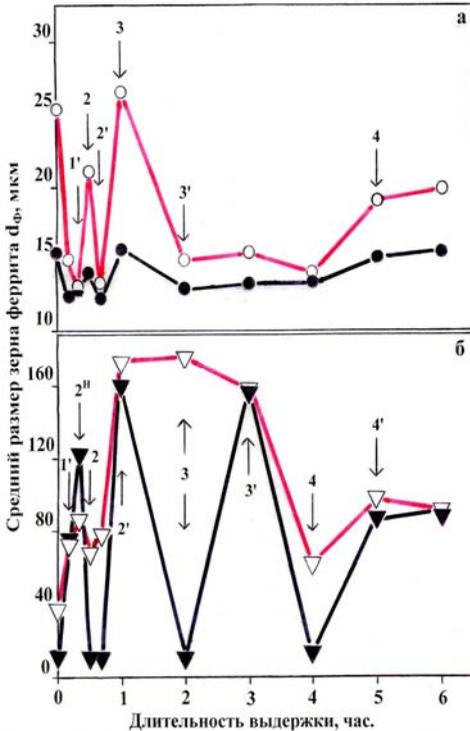


Рис.1. Характер изменения среднего размера зерна феррита в горячекатаном листовом прокате из исследованной стали 08пс в ходе отжига при температуре 680°C. а – исходный горячекатаный прокат толщиной 2,05мм (прокатка на НШСГП 1680 с $T_{КП}=750 - 760^{\circ}\text{C}$); б – конечный прокат толщиной 1,5мм (двойная горячая прокатка на лабораторном стане дуо 280 с $T_{КП}=650^{\circ}\text{C}$). Светлые обозначения – поверхностная, зачерненные – срединная зона. Цифрами без штрихов и со штрихами обозначены длительности выдержек, при которых формируются, соответственно, разнородные и равномерные по сечению проката структуры феррита.

Результаты текстурного анализа свидетельствуют о том, что выраженное различие типов текстур по сечению в образцах исследованного горячекатаного проката толщиной 1,3мм, полученного на лабораторном стане дуо 280 по режиму с $T_{КП} = 700^{\circ}\text{C}$, (текстура типа $\langle 110 \rangle$ в поверхностной зоне и $\langle 100 \rangle - \langle 111 \rangle$ в срединной) сохраняется при отжиге с температурой 680°C до выдержки длительностью 5ч. После выдержки длительностью 6ч образец этого проката становится полностью детектурированным, а его зеренная структура по сечению – равномерной.

Проведенный в настоящей работе анализ позволяет утверждать, что цикличность рекристаллизации горячекатаной листовой низкоуглеродистой стали в ходе выдержки при субкритической (680°C) температуре связана не только с перечисленными выше причинами наследственного влияния исходной структурно – текстурной неоднородности горячекатаного проката, низкого уровня поверхностной энергии плоскостей типа $\{110\}$ ферритных зерен, собственно, и сконцентрированных в поверхностной зоне проката, предполагаемой высокой подвижности зеренных границ в феррите поверхностной зоны, но и с особенностями развития всех ее стадий – первичной, собирательной и вторичной рекристаллизации.

Согласно [3,4] движущей силой собирательной и вторичной рекристаллизации в металлах является снижение свободной энергии в результате уменьшения протяженности межзеренных границ. При этом утверждается, что увеличение размеров зерен осуществляется по механизмам, предусматривающим преимущественный рост крупных зерен за счет более мелких путем миграции границ зерен (субзерен).

Детальный анализ образцов отожженного листового проката из исследованной стали, проведенный методами оптической и растровой электронной микроскопии (микроскоп EVO–50 XVP с энергодисперсионной приставкой INKA ENERDGY 450 – совместная разработка фирм «Карл Цейсс», Германия, и «Оксфорд Инструментс», Великобритания), показал наличие многочисленных дисперсных ($0,3\text{--}1,5\text{ мкм}$) включений цементита, распределяющихся в мелкозернистой структуре срединных зон, в основном, по межзеренным границам, а в крупнозернистой структуре поверхностных зон – преимущественно по субграницам внутри ферритных зерен. Учитывая, что существенное перетрансформирование структуры в образцах исследованной стали осуществляется уже при незначительных по длительности выдержках при отжиге, в нашем случае из-за блокирования межзеренных и субзеренных границ микровыделениями цементита реализация миграционных механизмов при росте зерен феррита и их последующем делении на мелкие в ходе развития циклической рекристаллизации представляется невозможной. Более реальными являются механизмы роста, осуществляемые [5] коалесценцией зерен (субзерен) и их группировок путем взаимных кристаллографических вращений и поворотов на небольшие углы с аннигиляцией межзеренных и субзеренных границ между ними.

Выраженное исходное различие размеров зерен феррита и текстуры по сечению, а также особенности структурных изменений исследованных образцов листового проката в процессе отжига приводят к реализации трех факторов, вызывающих возникновение систем упругих микронапряжений, которые дестабилизируют равномерное развитие рекристаллизации феррита при отжиге, и являются, таким образом, составляющими движущей силы процесса циклической рекристаллизации. В плане развития различающихся по уровню микронапряжений в поверхностном и се-

рединной зонах исследованного проката непосредственно в процессе отжига влияние первого фактора обусловлено затруднением взаимной аккомодации крупных зерен феррита в поверхностном слое по мере увеличения их размеров в процессе развития вторичной рекристаллизации, а второго – существенным различием кристаллографических ориентаций и дислокационного строения по линиям раздела поверхностных и срединных зон листового проката из исследованной стали.

Для обоснования третьего фактора на том же микроскопе EVO – 50 XVP с помощью приставки Nordlys II EBSD фирмы «Оксфорд Инструментс», (Великобритания) проведен анализ напряженного состояния в поверхностных и срединных зонах листового проката из исследованной стали. При определении уровня микронапряжений действие указанной приставки основано на анализе уширения Кикучи–линий, образующихся при пошаговой сканирующей дифракции пучка электронов на выбранных участках структуры сталей и сплавов (HKL EBSD – Technology). Приведенные на рис.1 данные по распределению участков локальных микронапряжений показывают, что в случае выдержки длительностью 1 час при температуре 680°C их уровень в срединной зоне является более высоким, чем в поверхностной (количество участков с микронапряжениями в срединной зоне в 4,26 раза – с учетом различия площадей сканирования – превышает количество таковых в поверхностной). Проведенным с помощью энергодисперсионного микронзонда анализом установлено, что участки с микронапряжениями имеют повышенное содержание углерода, марганца и серы (таблица).

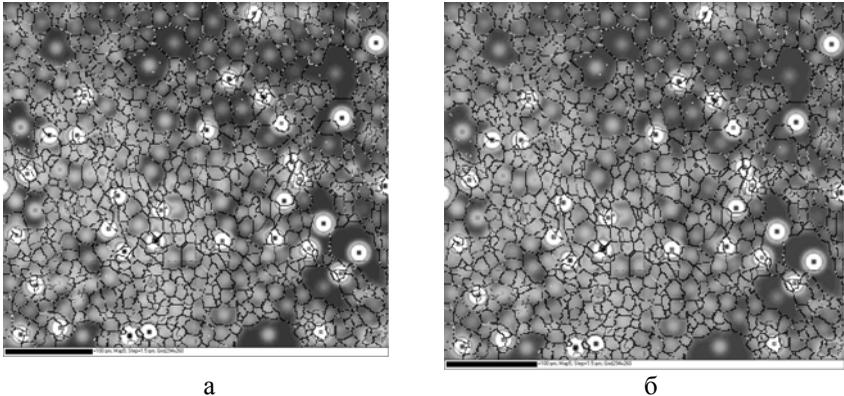


Рис.2. Общий вид и характер распределения участков с микронапряжениями в поверхностной (а– $\times 70$) и срединной (б– $\times 210$) зонах горячекатаного проката из исследованной стали с $T_{\text{КП}} = 700^{\circ}\text{C}$ после отжига при температуре 680°C с длительностью выдержки 1ч.

Поскольку при больших увеличениях растрового микроскопа какие-либо микрочастицы в указанных участках не выявляются, можно утверждать, что наблюдаемая повышенная концентрация углерода, марганца и серы и возникновение участков с микронапряжениями обусловлена образованием когерентно связанных с матрицей стали предвыделений цемента и сульфида марганца. Отмеченное выше различие текстуры и дислокационного строения феррита поверхностной и срединной зон исследованного проката в ходе выдержки при отжиге приводит к неадекватной кинетике повторяющихся процессов образования и растворения указанных предвыделений и сформировавшихся из них микрочастиц в этих зонах.

Таблица. Оценочные данные по содержанию углерода, основных легирующих элементов и примесей в участках с микронапряжениями и в общем объеме металла срединной зоны образца горячекатаного листового проката с $T_{\text{КП}} = 700^{\circ}\text{C}$ после отжига при температуре 680°C с выдержкой длительностью 1 час.

Участок анализа	Массовая доля элементов, %					
	C	Mn	S	P	Ni	Fe
С микронапряжениями –1	3,14	15,5	9,39	0,02	0,02	71,91
С микронапряжениями –2	2,19	6,85	6,85	0,00	0,07	87,12
Общий объем металла –1	1,24	0,38	0,02	0,09	0	98,27
Общий объем металла –2	1,39	0,30	0	0,07	0	98,05

Наблюдаемое фактическое различие суммарного уровня микронапряжений в поверхностной и срединной зонах исследованного горячекатаного проката, обусловленное последовательным чередованием при отжиге этапов образования и растворения указанных предвыделений и микрочастиц, является, тем самым, третьим дополнительным фактором, в немалой степени способствующим перетрансформированию ферритной структуры стали в конкретном цикле и развитию циклической рекристаллизации в целом.

Сформировавшаяся в результате указанных причин в объемах поверхностных и средних слоев образцов исследованной стали при отжиге система микронапряжений инициирует процессы деления образовавшихся крупных зерен (субзерен) на мелкие (этот процесс активируется незначительной разориентацией субзерен в пределах каждого крупного зерна) по

границам бывших субзерен, декорированных микровыделениями цемента, и приводит, таким образом, к повторному развитию стадий первичной, собирательной, а затем и вторичной рекристаллизации в каждом из циклов развивающейся при отжиге циклической рекристаллизации.

Выводы. Определены основные факторы, инициирующие развитие циклической рекристаллизации при отжиге в горячекатаном листовом прокате из низкоуглеродистой стали с исходной структурно–текстурной неоднородностью, а также механизмы реализующихся при этом структурных изменений.

1. *Нестеренко А.М., Левченко Г.В., Янковский А.В.* Особенности рекристаллизации феррита низкоуглеродистой горячекатаной стали при отжиге. // Теория и практика металлургии. – 2003. – № 1. – С. 54 – 59.
2. *Нестеренко А.М., Грицай Т.В., Здоровец С.А.* Циклическая рекристаллизация феррита при отжиге горячекатаной низкоуглеродистой листовой стали с исходно неравномерной структурой и текстурой. // Строительство, материаловедение, машиностроение. Сб. научн. трудов. – Дн–ск.: ПГАСА. – 2008. – Вып.45. – Ч. 3. – 130с.
3. *Вассерман Г., Гревен И.* Текстуры металлических материалов. – М.: Металлургия, 1969. – 655с.
4. *Горелик С.С.* Рекристаллизация металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1978. – 568с.
5. *Мазур В.И., Мазур А.В.* Особенности вторичной и собирательной рекристаллизации электротехнической стали. // Теория и практика металлургии. – 2007. – № 1. – С.42–47.

*Статья рекомендована к печати:
ответственный редактор
раздела «Металловедение и материаловедение»
докт.техн.наук, проф. Г.В.Левченко
рецензент канд.техн.наук М.Ф.Евсюков*

А.М.Нестеренко, Т.В.Грицай

Особливості розвитку циклічної рекристалізації фериту в горячекатаній низьковуглецевій листовій сталі

Метою роботи є дослідження циклічної рекристалізації фериту в горячекатаному прокаті з початково нерівномірною структурою і текстурою по перетину. Встановлено, що разом із спадковим впливом структурно–текстурної неоднорідності важливим чинником, що ініціює розвиток циклічної рекристалізації при відпалі в горячекатаному листовому прокаті з низьковуглецевої сталі, є процеси утворення і розчинення карбідних і сульфідних передвиділень і мікрочастинок.