

УДК:620.18:661.771.24

Циклічна рекристалізація фериту в гарячекатаній листовій низьковуглецевій сталі

А.М. Нестеренко, кандидат технічних наук
Г.В. Левченко, доктор технічних наук, професор
С.О.Воробей, кандидат технічних наук
Т.В. Грицай

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, Дніпропетровськ

Встановлено, що в низьковуглецевій гарячекатаній листовій сталі 08пс з вихідною неоднорідною структурою і текстурою за перерізом в ході відпалу при температурі субкритичного інтервалу спостерігається циклічна спонтанна рекристалізація фериту. Розвиток циклічної рекристалізації здійснюється за механізмами поділу великих за розміром зерен фериту на передрекристалізаційній стадії та коалесценції зерен фериту.

При гарячій прокатці тонких (1,5 – 2,0 мм) штаб із низьковуглецевої сталі з її закінченням при температурах міжкритичного інтервалу (МКІТ) за перерізом штаб формується різнозерниста структура [1, 2]. Великі зерна фериту при цьому найчастіше згруповані в поверхневій зоні штаб, а дрібні – в середині. Текстура за перерізом штаб також суттєво відрізняється: в поверхневій зоні вона описується, головним чином, орієнтуванням $\langle 110 \rangle$, а в серединній – $\langle 100 \rangle$ [1]. В залежності від призначення гарячекатаного прокату вплив неоднорідності структури та текстури є різним. У випадку використання цього прокату для операцій штампування наявність в його поверхневій зоні великих за розміром зерен фериту спричиняє утворення на поверхні виготовлених деталей невідповідного дефекту «апельсинова кірка», що є неприпустимим [2]. Різнозернистість прокату поряд з цим спричиняє значне зниження його пластичних властивостей [2 – 4]. В той же час наявність виражених орієнтацій феритних зерен $\langle 110 \rangle$ і $\langle 100 \rangle$ в трансформаторному листовому прокаті – вагомий фактор для забезпечення високої магнітної проникності [3] в разі збереження цих орієнтацій та забезпечення великих за розміром і однорідних зерен фериту при проходженні всього циклу виробництва.

Згідно [1] структурно-текстурна неоднорідність гарячекатаного листового прокату з низьковуглецевої сталі може бути пов'язана з розвитком рекристалізаційних процесів у фериті цієї сталі під час відпалу або повільного охолодження рулону, що зумовлює його різнозернистість та різнотекстурність навіть у випадку значних (10 – 12 годин) витримок при температурах субкритичного інтервалу (680 – 700 °С) і МКІТ (730 – 740 °С).

Враховуючи теоретичну та практичну важливість зазначеного питання, для встановлення особливостей розвитку рекристалізації в низьковуглецевій листовій сталі з вихідною нерівномірністю структури і текстури фериту за перерізом, представляється

Фазові перетворення

актуальним дослідити кінетику та механізми її рекристалізації в процесі відпалу при субкритичній температурі.

Досліджували гарячекатаний прокат товщиною 1,5 мм зі сталі 08пс вироблений на ШСПП 1680 МК "Запоріжсталь", зразки якого розміром 1,5x50x300 мм за визначеними температурно-деформаційними режимами прокатували на лабораторному стані ДУО-280. Температура нагрівання під прокатку – 1000 °С. Охолодження зразків перед прокаткою здійснювали таким чином, щоб забезпечувалася реалізація температур кінця прокатування $T_{\text{кп}} = 700, 750$ та 900 °С, що відповідають аустенито-феритній (МКІТ) та аустенітній областям прокатки. Обтиснення при прокатці складало 13 – 14 %. Попередні дослідження показали, що при швидкому охолодженні на повітрі за перерізом прокату утворюється однорідна структура, тому охолодження гарячекатаних зразків проводили в муфельній печі при температурі 600 °С з метою одержання вихідної неоднорідної структури і текстури за перерізом зразків. Рекристалізаційний відпал зразків прокату із зазначеними $T_{\text{кп}}$ проводили при температурі 680 °С з тривалістю витримок 10, 20, 30, 40 хв та 1, 2, 3, 4, 5, 6 годин.

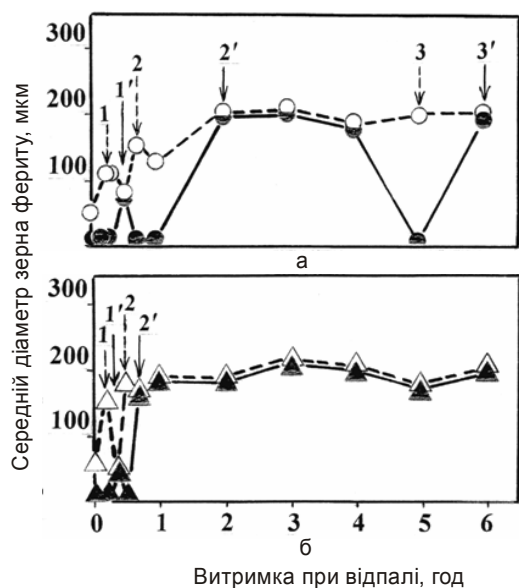


Рис. 1. Зміна середнього діаметра зерен фериту в залежності від витримки при відпалі. Температура кінця прокатки $T_{\text{кп}}$ 700 (а) і 750 °С (б). $\circ\Delta$ - поверхня зразків, \blacktriangle - середня зона зразків. 1, 2, 3 - різнозернисті структури, 1', 2', 3' - однорідні структури.

Дійсно, з рис. 1 слідує, що в зразках, прокатаних при $T_{\text{кп}}$ 700 і 750 °С, при відпалі спостерігаються відповідно 3 і 2 цикли утворення різнозернистої структури фериту за перерізом зразків. Проведені дослідження дозволили детально проаналізувати особливості трансформації структури фериту в кожному з циклів.

Так, наприклад, в зразках, прокатаних при температурі 700 °С, в ході першого циклу при витримках 10 і 20 хв різнозернистість фериту за перерізом прокату підсилюється (рис. 1 а), що пов'язано, в основному, з розвитком вторинної рекристалізації фериту поверхневого шару цього прокату. При витримці 30 хв утворюється однорідна за розміром зерна фериту структура за перерізом прокату

Дані мікроструктурного аналізу зеренної структури фериту в зразках показали, що після гарячої прокатки в аустенітній області та охолодження з піччю в них формується однорідна структура за перерізом зразків. У той же час у зразках, прокатаних при температурах 700 і 750 °С, структура за перерізом є виражено різнозернистою (рис. 1, 2 а).

При дослідженні кінетичної залежності зеренної структури фериту за перерізом зразків від витримки при відпалі було встановлено наступне. В зразках, прокатаних при температурі 900 °С, лише при відпалюванні протягом 3 – 6 год спостерігається утворення досить тонких шарів з великих зерен фериту в поверхневих зонах. В зразках дослідженого прокату ($T_{\text{кп}}$ 700 та 750 °С) рекристалізація розвивається навіть при незначних за часом витримках. Крім того, як вперше встановлено, в процесі рекристалізації при відпалі такого прокату зміна розміру зерна фериту за перерізом в залежності від часу витримки має циклічний характер.

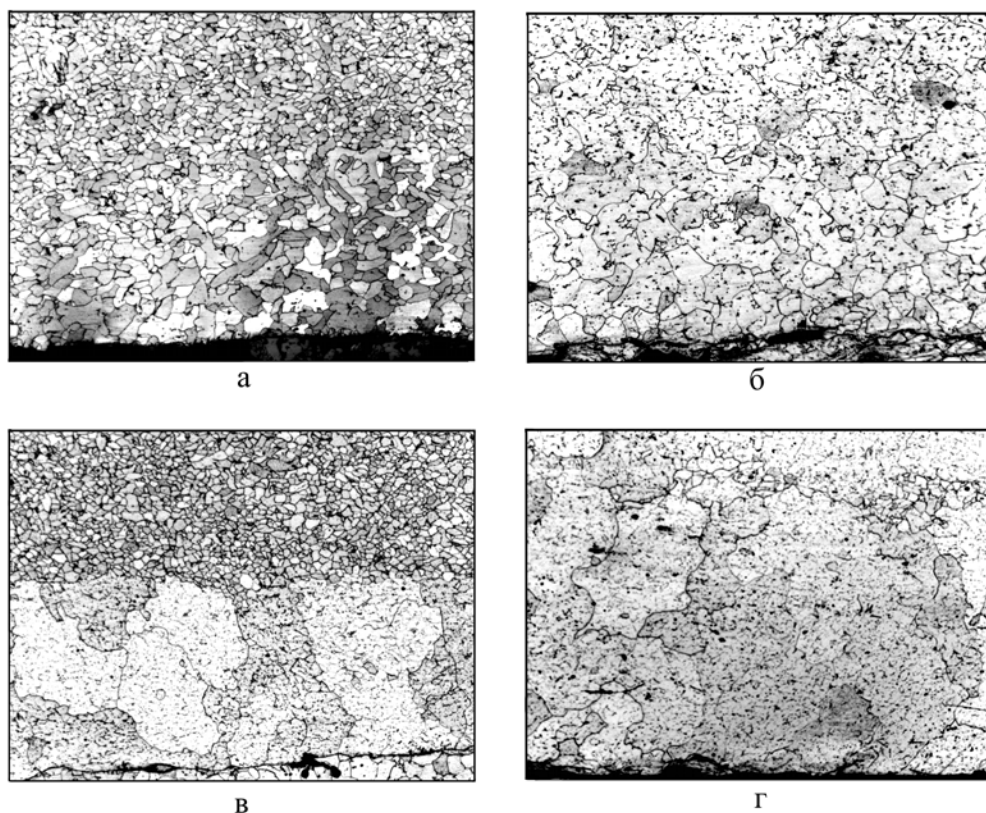


Рис. 2. Мікроструктура вихідного (а) та відпаленого (б, в, г) при температурі 680 °С гарячекатаного прокату зі сталі 08пс, ($T_{\text{кп}} 700 \text{ } ^\circ\text{C}$). Тривалість відпалу 30 хв (б), 40 хв (в) та 2 год (г). $\times 100$.

(рис. 2 б). Це свідчить про те, що конкретно при такій тривалості витримки вторинна рекристалізація фериту здійснилася і у середніх шарах прокату. На другому циклі при витримці 40 хв знову в результаті впливу структурно-текстурної спадковості виникає різнозернистість феритної структури (рис. 2 в), яка зберігається і при витримці протягом 1 год (рис. 1 а).

Подальше збільшення тривалості витримки до 2 год в ході цього ж другого циклу приводить до формування за всім перерізом прокату структури з однорідним за розміром зерном фериту (рис. 2 г).

Проведені дослідження показали, що розвиток різнозернистості за перерізом прокату, в основному, визначається прискореним ростом зерен фериту в поверхневій зоні. Отримані результати дозволяють стверджувати, що прискорений ріст зерен фериту в поверхневій зоні зразків прокату в ході відпалу при субкритичній температурі 680 °С зумовлений наступними факторами:

- прямим спадкуванням рекристалізаційною феритною структурою, що формується при відпалі, утворених при гарячій тонколистовій прокатці в поверхневій і середній зонах зразків виражених текстур різного орієнтування, відповідно, $\langle 110 \rangle$ і $\langle 100 \rangle$;

- наявністю в поверхневих шарах з вираженою текстурою з орієнтуванням $\langle 110 \rangle$ спеціальних границь полігонального типу з низькою щільністю дефектів між “старими” і “новими” зернами фериту при вторинній рекристалізації, орієнтація між

якими відповідає відомим співвідношенням Кронберга-Вільсона;

– найбільш низьким рівнем поверхневої енергії площин $\{110\}$ ОЦК гратки фериту в порівнянні з іншими низькоіндексними її площинами ($\sigma_{\{110\}} = 1,3 \cdot 10^{-4}$ Дж/см² проти $\sigma_{\{111\}} = 1,5 \cdot 10^{-4}$ та $\sigma_{\{100\}} = 1,6 \cdot 10^{-4}$ Дж/см² [4]);

– близьким до критичного в аспекті спонтанного росту феритного зерна ступенем деформації ($\varepsilon = 13 - 14$ %) при прокатці листового гарячекатаного прокату зі сталі 08пс.

Результати, які свідчили про можливість розвитку циклічної рекристалізації, отримані авторами [5] при аналізі структуроутворення в гарячедеформованих аустенітних сталях. Автори [5] констатували, що циклічність рекристалізації аустеніту залежить від таких факторів, як хімічний склад аустенітних сталей, температурно-деформаційні параметри їх гарячої деформації та режими наступної термічної обробки.

Вперше встановлена нами циклічність спонтанної рекристалізації фериту низьковуглецевої сталі в ході витримки при субкритичній температурі відпалу (680 °С) має зовсім інше походження та фізичну сутність і знаходить своє пояснення з наступних позицій. Відповідно до відомого підходу [4, 6] рушійною силою процесу вторинної рекристалізації в металах є зниження вільної енергії в результаті зменшення довжини міжзерених границь. Відомо, що процес вторинної рекристалізації здійснюється за двома механізмами, один із яких передбачає переважаючий розвиток (ріст) великих зерен за рахунок дрібних шляхом міграції спеціальних границь полігонального типу, а другий, більш наближений до реальних умов, – шляхом коалесценції зерен (субзерен) і їхніх угруповань з анігіляцією вказаних вище границь між ними.

Виражена вихідна відмінність розмірів зерен фериту і текстури за перерізом зразків листового прокату призводить до реалізації двох факторів, що дестабілізують рівномірність розвитку рекристалізації фериту при відпалі. Вплив першого фактору зумовлений утрудненням взаємної акомодатії великих зерен фериту в поверхневому шарі в міру збільшення їхніх розмірів у процесі розвитку вторинної рекристалізації, а другого – істотним гальмуванням міграції границь фериту лініями розділу поверхневих і середніх шарів при вторинній рекристалізації через відмінність їх кристалографічних орієнтацій та дислокаційної будови.

В результаті в обсягах поверхневих і середніх шарів зразків при відпалі виникають напруження, які на перерекристалізаційній стадії кожного циклу ініціюють спонтанні процеси розподілу великих зерен, що утворилися, на дрібні (цей процес активується незначною розорієнтацією субзерен у межах кожного великого зерна) і повторного розвитку первинної, збиральної та вторинної рекристалізації. Можна припустити, що циклічність цих процесів визначається вихідним ступенем відмінності параметрів зеренної структури і текстури гарячекатаного прокату. Процес циклічної рекристалізації протікає доти, поки не відбудеться суттєве зменшення абсолютних значень та вирівнювання щільності кристалографічних орієнтувань зерен фериту за перерізом прокату (рис. 3).

Аналіз текстури зразків листового прокату проводили методом зворотніх полюсних фігур Харріса [3].

Текстура вихідного гарячекатаного та відпаленого прокату, отриманого при $T_{\text{кп}} 900$ °С (рис. 3), є досить однорідною.

Для встановлення можливого впливу на аномальний ріст зерен у поверхневій зоні, крім зазначених вище факторів нерівномірного розподілу вуглецю, легуючих елементів і мікрочастинок інших фаз, було проведено відповідне дослідження¹ за

¹ Дані отримані ст. н. спів. Інституту надтвердих матеріалів НАНУ Ткачом В.М.

Фазові перетворення

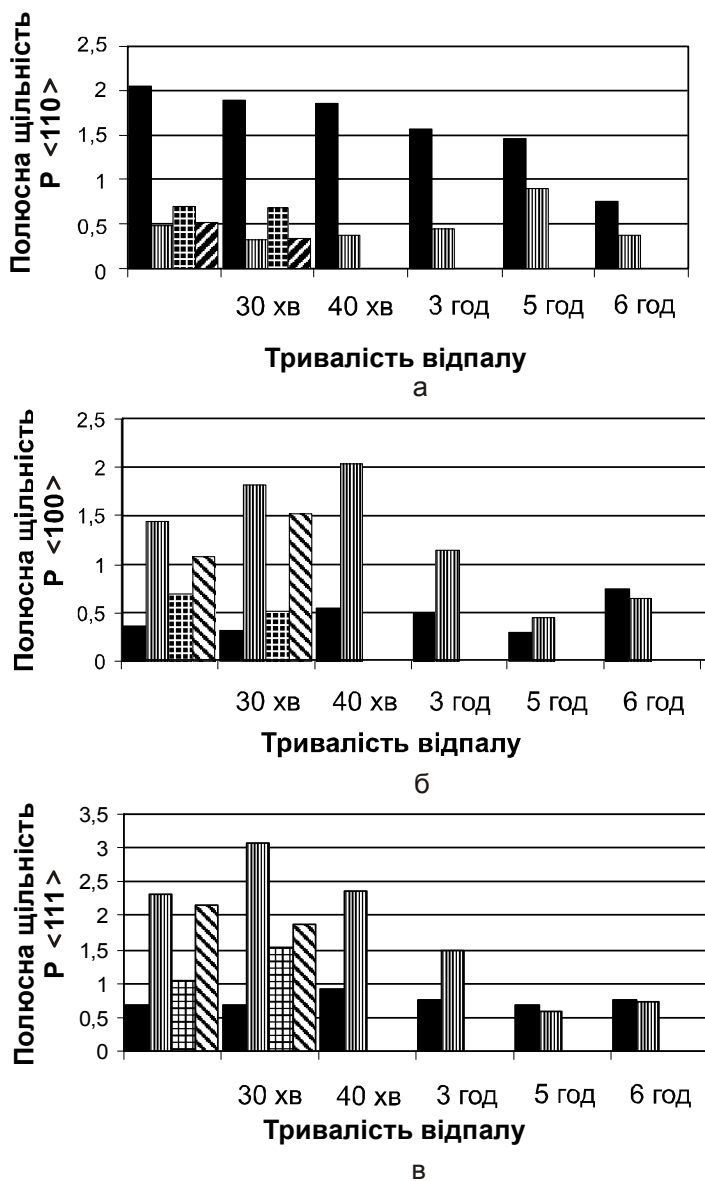


Рис. 3. Гістограми розподілу орієнтувань текстури в листовому прокаті зі сталі 08пс.
 ■ $T_{\text{кп}} = 700\text{ }^\circ\text{C}$ – поверхня зразка, ▨ $T_{\text{кп}} = 700\text{ }^\circ\text{C}$ – середина зразка, ▩ $T_{\text{кп}} = 900\text{ }^\circ\text{C}$ – поверхня зразка, ▤ $T_{\text{кп}} = 900\text{ }^\circ\text{C}$ – середина зразка.

допомогою растрового електронного мікроскопу EVO-60, оснащеного мікрозондом ІНКА ENERGY 350 (розробка фірми “Карл Цейсс”).

Результати електронномікроскопічного аналізу свідчать про те, що вміст вуглецю в спостережених мікрочастинках поверхневої і серединної зон сталі близький до стехіометричного складу цементиту – 6,67 % (мас. частка). Показано, що частинки цементиту в зразках розміщуються переважно на субграницях великих зерен, а також на границях великих та дрібних зерен.

Завдяки цьому здатність границь зерен до міграції фактично унеможливується і розвиток рекристалізаційних процесів на збиральній та вторинній її стадіях, як

відмічалось вище, може бути забезпечений саме механізмом анігіляції його полігональних зерених границь (коалесценції зерен фериту).

Поділ великих зерен фериту на дрібні в процесі циклічної рекристалізації (в разі відповідного зростання рівня напружень у певному місті зразка) здійснюється, в основному, по тих же колишніх субграницях та границях поверхневої та серединної зон (рис. 2 б, г) зі збереженням набутих орієнтувань субзерен, зерен і текстури зазначених зон в цілому. Як свідчать представлені на рис. 3 дані, суттєве зниження орієнтувань текстури цих зон в зразках з $T_{\text{кп}}$ 700 і 750 °С спостерігається лише при значних витримках.

Висновки Вперше встановлено, що в низьковуглецевому горячекатаному листовому прокаті зі сталі 08пс з вихідною неоднорідною структурою і текстурою за перерізом в результаті реалізації ефекту структурно-текстурної спадковості в ході відпалу при температурі субкритичного інтервалу (680 °С) спостерігається циклічна спонтанна рекристалізація фериту.

Розвиток циклічної рекристалізації здійснюється за механізмами поділу великих за розміром зерен фериту на передрекристалізаційній стадії та коалесценції зерен фериту (шляхом анігіляції полігональних границь) на збиральній та вторинній її стадіях.

Література

1. Левченко Г.В., Нестеренко А.М., Янковский А.В. Влияние условий горячей прокатки и последующего охлаждения на особенности формирования текстуры низкоуглеродистой стали // Теория и практика металлургии. – 2005. – № 1 – 2. – С. 85 – 90.
2. Бочков Н.Г., Липухин Ю.В., Пименов А.Ф. Производство качественной низкоуглеродистой листовой стали. – М.: Металлургия, 1983. – 184 с.
3. Вассерман Г., Гревен И. Текстуры металлических материалов. – М.: Металлургия, 1969. – 655 с.
4. Полухин П.И., Горелик С.С., Воронцов В.К. Физические основы пластической деформации. – М.: Металлургия, 1982. – 584 с.
5. Хейфец Р.Г., Резчик Н.В., Марек И.М. Циклическая рекристаллизация деформированных аустенитных сталей. – МетОМ. – 1982. – № 2. – С. 37 – 39.
6. Горелик С.С. Рекристаллизация металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1978. – 567 с.

Одержано 22.09.08

А.М. Нестеренко, Г.В. Левченко, С.А.Воробей, Т.В. Грицай

Циклическая рекристаллизация феррита в низкоуглеродистой горячекатаной стали

Резюме

Установлено, что в низкоуглеродистой горячекатаной листовой стали 08пс с исходной неоднородной структурой и текстурой по сечению при отжиге в субкритическом интервале температур наблюдается спонтанная циклическая рекристаллизация феррита. Определено, что развитие циклической рекристаллизации осуществляется по механизмам деления больших зерен феррита (на передрекристаллизационной стадии) и коалесценции зерен феррита (при собирательной и вторичной рекристаллизации).

A.M. Nesterenko, G.V. Levchenko, S.A. Vorobei, T.V. Gritsai

Cyclical recrystallization of ferrite in the low-carbon hot-rolled steel

Summary

It is found that spontaneous cyclical recrystallization of ferrite in the low-carbon hot-rolled sheet steel 08 nc takes place at the annealing under the temperatures of the subcritical interval. It is determined that development of the cyclical recrystallization is carried out accordingly the mechanisms of division of the big grains of ferrite (stage before the recrystallization) and their coalescence (at the collective and secondary recrystallization).

Степан Пантелеєвич Дорошенко



5 лютого на 78-му році пішов з життя відомий вчений у галузі ливарного виробництва, доктор технічних наук, професор Дорошенко Степан Пантелеєвич.

Після закінчення Київського політехнічного інституту у 1955 році С.П. Дорошенко працював технологом ливарного цеху і заступником головного металурга заводу «Більшовик». Починаючи з 1959 р. і до кінця життя його наукова і педагогічна діяльність пов'язана з НТУУ – «КПІ», де він закінчив аспірантуру, працював асистентом, доцентом, професором, завідував кафедрою (1974 – 1991 рр.), захистив кандидатську (1963 р.) і докторську (1972 р.) дисертації.

За цей період Степан Пантелеєвич підготував 27 кандидатів і 4 доктори технічних наук. Ним одержано 41 патент, опубліковано 650 наукових робіт, серед яких понад 50 монографій, книг і брошур.

Як провідний спеціаліст України в галузі розробки і впровадження сучасних матеріалів для одноразових піщаних форм і стрижнів С.П. Дорошенко набув широкого визнання в Японії, Росії, Китаї, Чехії, Польщі та інших країнах. У 1998 р. він був удостоєний почесного звання «Заслужений професор НТУУ – «КПІ»»

Степан Пантелеєвич був людиною з широким світоглядом – любив, досліджував і пропагував ливарне виробництво, знайомив широке коло читачів з його тисячолітньою історією. Він був щирою, щедрою людиною, добрим товаришем і шанованим колегою. Незадовго до смерті він створив на рідній кафедрі кабінет художнього лиття, до якого передав свою безцінну колекцію художніх литих виробів, яку збирав майже все життя.

Національний технічний університет України «КПІ», Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, редакційна колегія журналу висловлюють глибоке співчуття рідним і близьким Степана Пантелеєвича Дорошенко.