УДК 669-1

С. В. Данилов*, В. И. Пастухов, В. Ю. Ярков, А. Е. Устинов, Э. Г. Мурадян

Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург

* *s.v.danilov@urfu.ru*

Научный руководитель — проф., д-р техн. наук М. Л. Лобанов

ВОЗМОЖНОСТИ ОРИЕНТАЦИОННОЙ МИКРОСКОПИИ ПРИ АНАЛИЗЕ ЗЕРЕННОЙ СТРУКТУРЫ В НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЯХ ПОСЛЕ TMCP

Методом ориентационной микроскопии проанализирована зеренная структура образцов малоуглеродистой низколегированной трубной стали, полученных контролируемой термомеханической обработкой. Показаны возможности получения различных зеренных характеристик в зависимости от заданных «граничных» условий анализа.

Ключевые слова: трубные стали, контролируемая термомеханическая обработка, бейнит, ориентационная микроскопия, текстура

S. V. Danilov, V. I. Pastukhov, V. Yu. Yarkov, A. E. Ustinov, E. G. Muradyan

THE ORIENTATION MICROSCOPY POSSIBILITIES IN THE ANALYSIS OF GRAIN STRUCTURE IN LOW CARBON STEELS AFTER TMCP

The method of orientation microscopy (EBSD) is used to study the grain structure of low-carbon, low-alloy pipe steel sheets processed by controlled thermomechanical processing (TMCP). The possibilities of obtaining different grain characteristics depending on the specified analysis limitations are shown.

Key words: pipeline steel, thermo-mechanical controlled processing, bainite, EBSD, texture

Целью настоящей работы являлась оценка возможностей ориентационной микроскопии (ОР) [1], основанной на дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD), для анализа зеренной структуры в сложных случаях: заметная разнозернистость, большое количество мелких зерен, наличие в большом количестве малоугловых границ, структура возникла в результате сдвигового превращения и т. п.

Исследование проводилось на образцах малоуглеродистой низколегированной стали 06 Г2 МБ с преимущественно феррито-бейнитной структурой, приобретенной в результате контролируемой термомеханической обработки (Thermo Mechanical Controlling Processing — TMCP) [2; 3].

Электронно-микроскопическое исследование структуры проводились на растровом микроскопе Tescan Mira3 с автоэмиссионным катодом при ускоряющем напряжении 20 кВ. Для определения ориентировки отдельных зерен (кристаллитов) и анализа локальной текстуры использовалась приставка EBSD HKL Inca с системой анализа Oxsford Instruments. Исследуемые области имели размеры приблизительно 200×200 мкм^2 (0,2×0,2 мм^2). Шаг сканирования — 0,1 мкм (100 нм). Погрешность определения ориентации кристаллической решетки — не более ± 1° (в среднем ± 0,6°).

Высокая точность идентификации ориентаций, и, соответственно, локальных разориентаций при проведении EBSD-анализа (выше 90 % распознавания для всех исследуемых областей) позволили использовать программное обеспечение Oxsford Instruments для определения параметров микроструктуры образцов по распределению всех межкристаллитных границ, характеризующихся углами разориентации, образующих их зерен (кристаллитов). Методом ОР были определены следующие характеристики кристаллитов или «зерен»: 1) средний размер ($D_{ср}$), как диаметр окружности эквивалентной средней площади кристаллитов; 2) максимальный размер кристаллита (D_{max}); 3) среднее количество соседних кристаллитов ($N_{с}$); вытянутость в направлении прокатки ($X_{ср}/D_{ср}$) (таблица).

Все характеристики определялись для трех случаев, отличающихся условным определением понятия «кристаллит» (или «зерно»): I — в качестве кристаллита принимался объект, ограниченный со всех сторон границами с углами разориентации не менее 7°, анализ проводился по всем кристаллитам, в том числе имеющими размер меньше 1 мкм (рис., *а*); II — в качестве кристаллита принимался объект, ограниченный со всех сторон границами с углами разориентации не менее 15°, анализ проводился по всем кристаллитам, в том числе имеющими размер меньше 1 мкм (рис., *б*); III — в качестве кристаллита принимался объект, ограниченный со всех сторон границами с углами разориентации не менее 15°, анализ проводиться по всем кристаллитам, исключение составили кристаллиты размером меньше 1 мкм (рис., *в*). Учет 10-и градусных зерен (то есть от 7 до 15°) связан с возможностью их возникновения в структурах, образующихся по сдвиговому механизму согласно [4], причем в заметном количестве (~ 15 % от общего количества высокоугловых границ), то есть случай I представляется наиболее правильным.

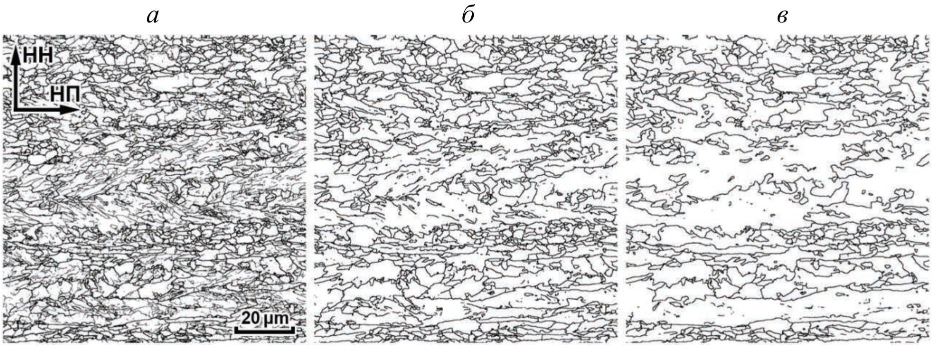

Рис. Микроструктура стали 06Г2МБ после ТМСР,
выявленная при различных условиях ОР:
а — I, *б* — II; *в* — III

Таблица

Характеристики кристаллитов («зерен»)
в микроструктуре стали 06Г2МБ после ТМСР, определенные методом ОР

Характеристики	Различные условия ОР		
	I	II	III
$D_{ср}$, мкм	1,1	2,6	3,2
D_{max}, мкм	16,6	16,6	27,4
$N_с$, шт.	4,3	8,5	8,7
$X_{ср}/D_{ср}$	2,2	3,3	3,5
Кол-во кристаллитов, шт.	3580	1246	636

Учет границ только с углом разориентации более 15° соответствует «классическому» подходу к понятию «высокоугловая межзеренная граница», то есть соответствует классическому определению «зерна». Исключение кристаллитов, размером меньше 1 мкм, заметная часть которых всегда соответствует не идентифицированным микрообластям, максимально приближает изображение EBSD к металлографическому (рис., *б*, *в*). Однако в случае ОР процедура, соответствующая случаю III, фактически, выделяет не зерна, а области с практически одинаковой кристаллографической текстурой, т. е. области возможного распространения трещин при разрушении, согласно [3].

Работа выполнена при поддержке стипендии Президента Российской Федерации, проект СП-259.2018.1.

Литература

1. Методы исследования текстур в материалах: учебное пособие / М.Л. Лобанов [и др.]. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та. 2014. 115 с.

2. Texture Inheritance on Phase Transition in Low-Carbon, Low-Alloy Pipe Steel after Thermomechanical Controlled Processing / M. L. Lobanov [et al.] // Steel in Translation. 2017. V. 47. P. 710–716.

3. Effect of Bainite Crystallographic Texture on Failure of Pipe Steel Sheets Made by Controlled Thermomechanical Treatment / I. Y. Pyshmintsev [et al.] // Metallurgist. 2016. V. 60. P. 405–412.

4. Investigation of Special Misorientations in Lath Martensite of Low-Carbon Steel Using the Method of Orientation Microscopy / M. L. Lobanov [et al.] // The Physics of Metals and Metallography. 2016. V. 117. P. 254–259.