

Анализ процессов структурообразования при отжиге проката

Ёркулов Сардор Илхом ўгли
Ризаева Нигора Мирвохид кизи
Ташкентский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г.Ташкент

В процессе отжига холоднокатаного стального листа в материале протекают три фундаментальных процесса, обусловленных термодинамической нестабильностью микроструктуры холодного проката: возврат, рекристаллизация и полиморфное фазовое превращение (аустенитизация). Кроме того, в зависимости от химического и фазового состава стали, в ходе нагрева возможно выделение и растворение вторых фаз. Указанные процессы могут происходить как последовательно, так и параллельно, конкурируя друг с другом. В результате конкуренции эволюция микроструктуры многократно усложняется.

Начнем обзор с возврата и рекристаллизации. При тех условиях отжига, которые имеют место при производстве стального листа, эти два процесса всегда развиваются параллельно, поэтому целесообразно рассматривать их совместно.

Возврат и рекристаллизация

Рекристаллизация является реакцией зарождения и роста новых зерен, очищенных от дислокационной субструктуры, которая была накоплена в материале при деформации. Соответственно, ее кинетика определяется как скоростью зарождения центров рекристаллизации, так и скоростью их последующего роста. Однако, если описание роста не представляет больших сложностей, по крайней мере, в качественном аспекте, то зарождение новых зерен является сложным, пока еще не до конца изученным явлением. Таким образом, основная проблема моделирования рекристаллизации заключается в построении адекватной модели для описания скорости зарождения.

Существует большое число полуэмпирических моделей рекристаллизации, основанных на использовании уравнения Авраами. Эти модели предсказывают практически значимые параметры: время рекристаллизации, критическую температуру (температуру, при которой начинается рекристаллизация в процессе нагрева), критическую деформацию (степень деформации, превышение которой делает возможной рекристаллизацию в ходе отжига) и конечный размер рекристаллизованного зерна. Однако им присущ один недостаток: способности предсказания кинетики рекристаллизации ограничены тем диапазоном материалов и режимов отжига, на базе которых были определены подгоночные параметры модели. Это стимулировало фундаментальные исследования, которые позволили сформулировать общие аналитические модели, основанные на представлении об образовании центров рекристаллизации в результате эволюции ячеистой и субзеренной структуры. Хотя сами по себе указанные модели непригодны для проведения количественных расчетов, но на их основе позднее были предложены эффективные упрощенные методы, которые будут рассмотрены ниже.

Инкубационное время образования потенциального зародыша. На начальной стадии отжига в ходе возврата происходит трансформация структуры, образовавшейся при холодной деформации, в субзеренную структуру.

После холодной деформации образуется структура, морфология которой определяется степенью деформации: хаотическое распределение дислокаций – ячеистая структура – фрагментированная структура (в верхнем ряду слева направо). В ходе возврата во всех случаях образуется субзеренная структура, но с разным размером субзерна δ и разным уровнем ориентировок.

На следующей стадии возврата происходит рост субзерна, который и приводит, в конечном итоге, к образованию центра рекристаллизации. Необходимое условие трансформации субзерна в центр рекристаллизации – это наличие у него большеугловой границы (БУГ) или приобретение им БУГ в ходе роста. Данное условие из-за низкой подвижности малоугловых

границ (МУГ). Если субзерно непосредственно примыкает к межзеренной границе, то оно уже с самого начала имеет с одной стороны БУГ. В этом случае работает механизм вспучивания границы (SIBM – Strain Induced Boundary Migration) и инкубационный период для образования центра рекристаллизации не требуется.

Если субзерно не примыкает к границе, то оно может приобрести БУГ в процессе своего роста. Это возможно в случае, когда его рост происходит на фоне градиента ориентации, который является вполне характерным для внутризеренной деформационной структуры. При наличии градиента разориентировка на границе субзерна по мере его роста увеличивается и в некоторый момент граница трансформируется из МУГ в БУГ. Только приобретая в течении некоторого инкубационного периода подвижную границу, субзерно может стать потенциальным центром рекристаллизации.

Градиент ориентации был наибольшим вблизи тройных стыков, а наименьшим – внутри зерна. Результаты измерения градиента суммированы в табл. 1.1.

Таблица 1.1. Градиент ориентации внутри зерна, около границ и около тройных стыков после холодной прокатки с 60% обжатием

Material	%	θ/δ_B ($^\circ/\mu\text{m}$)	θ/δ_{GB} ($^\circ/\mu\text{m}$)	θ/δ_{TJ} ($^\circ/\mu\text{m}$)
Fe non-oriented	10	0.4	0.9	1.2
Fe α grains	40	0.3	0.6	1
Fe γ grains	50	0.5	1.1	>3.5

В работе были сделаны оценки инкубационных времен образования зародышей для различных областей в холоднокатаном железе. Табл. 1.2 суммирует расчетные времена, необходимые для формирования эмбрионов в различных областях.

Таблица 1.2. Расчетные инкубационные времена образования зародышей при 550°C для различных областей в холоднокатанном железе (B внутри зерна; GB – граница зерна; TJ – тройной стык)

Sample	$t^*(B)$ (s)	$t^*(GB)$ (sec)	$t^*(TJ)$ (s)
Fe non-oriented	22	5	2
Fe α fiber	32	12	4
Fe γ fiber	16	3	0

Видно, что инкубационные времена на тройных стыках крайне маленькие, и образование зародышей происходит на самом начальном этапе отжига, что согласуется с экспериментом (55% наблюдаемых зародышей через 5 секунд после начала выдержки). Кроме того, в согласии с экспериментом модель предсказывает, что в γ – волокнах по сравнению с α – волокнами образование зародышей происходит быстрее. Относительно большое инкубационное время, полученное в расчете для зарождения внутри зерна, также качественно согласуется с экспериментом, в котором зафиксировано пренебрежимо малое число зерен, зародившихся во внутреннем объеме.

Вывод. В заключении следует заметить, что количественное сопоставление времен, приведенных в табл. 1.2, с экспериментом не имеет смысла, поскольку большая часть зародышей изначально имеют подвижную большеугловую границу, непосредственно примыкая к границе исходного зерна.

Литература

1. Целиков А.И., Гришков А.И. Теория прокатки. Металлургия, 1970.
2. Выдрин В.Н. динамика прокатных станов. Свердловск: Metallurgizdat, 1960.
3. Металловедение. Сталь (составители: В. Енихе и др.), том 1. М.: Металлургия, 1995. 447 с.
4. Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтев. Материаловедения. 1990-г
5. А.П. Грудев Теория прокатки. Металлургия -1998