

ВЛИЯНИЕ КРУЧЕНИЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ И ПОСЛЕДУЮЩИХ ОТЖИГОВ НА СТРУКТУРУ И МИКРОТВЕРДОСТЬ СТАЛИ 06МБФ

Кошовкина В.С.¹, Майер Г.Г.²

Научный руководитель: Астафурова Е.Г.², д.ф.-м.н., доцент

¹Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 634021,

Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/4

E-mail: koshovkina_vs@mail.ru

Введение

В последнее время активно развивается направление, связанное с формированием ультрамелкозернистых (УМЗ) состояний в металлах и сплавах методами интенсивной пластической деформации (ИПД) [1-3], с использованием которых можно добиться уменьшения размера зерна и получить высокопрочное состояние. Известно большое количество схем ИПД – равноканальное угловое прессование, кручение под давлением, винтовая экструзия и др. [1]. Работ посвященных глубокому деформированию сталей немного, что связано с технологическими трудностями, хотя ИПД сталей позволяет создавать материалы с высокими прочностными характеристиками, которые имеют перспективы дальнейшего практического применения. УМЗ структуры обладают высокой запасенной энергией и при нагреве могут переходить в крупнокристаллическое состояние [1-4], поэтому важным вопросом при создании таких материалов является их термическая стабильность при отжигах.

В работе исследовали влияние кручения под давлением (КГД) на структуру и микротвердость низкоуглеродистой стали 06МБФ и термическую стабильность этих свойств.

Методика эксперимента

Низкоуглеродистую сталь 06МБФ (Fe-0,1Mo-0,6Mn-0,8Cr-0,2Ni-0,3Si-0,2Cu-0,1V-0,06Nb-0,09C, мас.%) исследовали в исходно ферритном состоянии, полученном после закалки от 920 °С (30мин) в воду и отпуска при 670 °С (1ч).

КГД проводили под давлением 4 ГПа на наковальнях Бриджмена при температуре T=20°C на пять полных оборотов. После КГД получали диски диаметром 10 мм и толщиной 0,2 мм.

Термическую стабильность, сформированного состояния исследовали после часовых отжигов в интервале температур 500÷700 °С.

Анализ микроструктуры проводили с помощью просвечивающего электронного микроскопа Technai G2 FEI при ускоряющем напряжении 200 кВ. Средний размер структурных элементов определяли методом секущих по электронно-микроскопическим снимкам.

Рентгеновские исследования выполняли на дифрактометре Shimadzu XRD-6000 с использованием Cu K α излучения. Расчет микроискажений кристаллической решетки и

размеров областей когерентного рассеяния (ОКР) осуществляли методом аппроксимации.

Прочностные свойства стали до и после ИПД оценивали путем измерения микротвердости по методу Виккерса с использованием микротвердомера Dugam 5 при нагрузке на индентор 200 г, время нагружения 10 сек. За среднее значение микротвердости брали значение, измеренное на середине радиуса диска.

Результаты эксперимента

Исходная структура стали состояла из полиэдрического феррита с размером зерна 2,4 мкм и пластинчатого феррита с толщиной пластин ~ 0,4 мкм [5].

Показано, что КГД исследуемой стали приводит к формированию УМЗ структуры в исследуемой стали (рисунок 1). Микродифракционные картины (электроннограммы) после КГД носят кольцевой характер (рисунок 1а, вклейка). На кольцах различимы отдельные рефлексы, их равномерное распределение по кольцу и наличие азимутальных размытий свидетельствуют о наличии высоко- и малоугловых разориентировок между структурными элементами, с которых получены электронограммы. Средний размер элементов зеренно-субзеренной структуры, рассчитанный на основе анализа темнопольных электронно-микроскопических изображений (рисунок 1б), составляет 100 нм. Методом просвечивающей электронной микроскопии обнаружены карбиды цементитного типа разной дисперсности (15–90 нм в исходном состоянии и < 5 нм после КГД) на границах и внутри элементов структуры, их расположение в структуре квазиоднородно.

После КГД наблюдали увеличение значения микротвердости в 3 раза по сравнению с исходным состоянием (табл.1).

Методом рентгеноструктурного анализа установлено, что КГД вызывает уменьшение интенсивности и увеличение ширины рентгеновских линий. Значения микродеформации кристаллической решетки составляют $2,0 \times 10^{-4}$ в исходном состоянии и достигают значений $3,4 \times 10^{-3}$ после КГД. Размеры областей когерентного рассеяния составляют более 200 нм в исходном состоянии и уменьшаются до 40 нм после кручения. Следовательно, КГД приводит к измельчению исходной структуры и повышению внутренних напряжений в стали.

Таблица 1. Влияние КГД и последующих отжигов на микротвердость (H_{μ} , ГПа) исследуемой стали

Состояние	без отжига	отжиг при 500°C	отжиг при 600°C	отжиг при 700°C
исходное	2,0	-	-	-
КГД	6,0	6,5	4,4	1,8

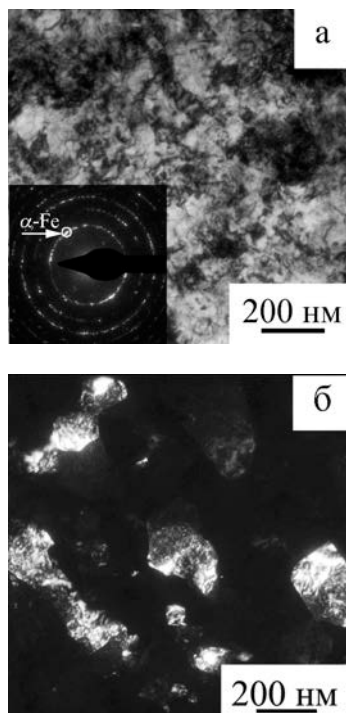


Рисунок 1. Электронно-микроскопические изображения структуры стали 06МБФ после КГД: а) светлопольное изображение и микродифракционная картина, полученная с участка фольги площадью $S=0,95 \text{ мкм}^2$; б) темнопольное изображение, полученное в рефлекс $\alpha\text{-Fe}$

Изучение влияния отжигов на сформированную при КГД ультрамелкозернистую структуру стали показало, что отжиг при 500 °С не вызывает роста элементов структуры. Средний размер (суб)зерна, определенный по темнопольным электронно-микроскопическим изображениям, составляет 110 нм, то есть имеет близкие значения к состоянию после КГД. После отжига при 600 °С средний размер элементов зеренно-субзеренной структуры возрастает до 315 нм. А после отжига при 700 °С структура стали трансформируется в мелкокристаллическую с размером зерна 4 мкм. Наряду с ростом элементов зеренно-субзеренной структуры наблюдали укрупнение карбидов.

Отжики приводят к релаксации структуры, уменьшению величины уширения рентгеновских линий, росту ОКР (180 нм после отжига при 500 °С и более 200 нм после отжиге при 600 и 700 °С), спаду значений микродеформации кристаллической решетки (до $1,2 \times 10^{-3}$ после

отжига при 500°C, до $0,4 \times 10^{-3}$ – при 600°C и до $0,6 \times 10^{-4}$ – при 700 °С).

Изучение эволюции значений микротвердости при отжиге показало, что вплоть до температуры 500 °С высокие значения микротвердости, сформированные в стали при КГД, сохраняются (табл.1). Последующее увеличение температуры отжига сопровождается спадом значений микротвердости и по достижении температуры 700 °С значения микротвердости приближаются к значению для исходного состояния.

Выводы

Методом кручения под давлением в стали 06МБФ сформировано ультрамелкозернистое состояние со средним размером структурных элементов 100 нм и значением микротвердости 6 ГПа. Ультрамелкозернистый характер структуры и высокие значения микротвердости сохраняются вплоть до температуры отжига 500 °С (1 ч). После отжиге при более высоких температурах происходит рост элементов структуры и уменьшение значений микротвердости, что вызвано процессами возврата и рекристаллизации.

Список литературы

1. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы. М.: ИКЦ Академкнига, 2007. – 398 с.
2. Дегтярев М.В., Воронова Л.М., Чашухина Т.И. Рост зерна при отжиге армко-железа с ультрадисперсной структурой различного типа, созданной деформацией сдвигом под давлением// ФММ. – 2005. – Т.99. – №3. – С.58-68.
3. Zhilyaev A.P., Langdon T.G. Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications/ Progress in Materials Science.– 2008. – V. 53. – P. 893–979.
4. Горелик С.С., Добаткин С.В., Капуткина Л.М. Рекристаллизация металлов и сплавов. – М.: МИСиС, 2005. – 432с.
5. Астафурова Е.Г., Захарова Г.Г., Найденкин Е.В., Рааб Г.И., Одесский П.Д., Добаткин С.В. Особенности микроструктуры и механическое поведение стали 06МБФ после равноканального углового прессования/ Письма о материалах. – 2011. – Т.1. – С.198-202.

Авторы выражают благодарность профессору Добаткину С.В., д.т.н. Одесскому П.Д., д.ф.-м.н. Найденкину Е.В. за помощь в организации исследований. Исследование проведено на оборудовании Томского материаловедческого центра коллективного пользования и Новосибирского государственного технического университета. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке стипендии Президента РФ (СП-4682.2013.1).