

© В.О. Караусова, В.Р. Бараз, О.Н. Федоренко, 2012 г.
ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б.Н. Ельцина»,
г. Екатеринбург
verolka0905@mail.ru

СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ, ПОДВЕРГНУТОЙ ФРИКЦИОННОМУ ДЕФОРМИРОВАНИЮ

При статическом упрочнении верхнего слоя материала, связанном с движущимся под нагрузкой индентором над неподвижным образцом в условиях трения скольжения, в поверхностном слое наблюдаются заметные структурные изменения. Они инициируются сильной пластической деформацией в зоне фрикционного контакта соприкасающихся материалов, их возможным разогревом вследствие выделения тепла трения, влиянием окружающей среды. По мере проведения обработки, помимо сдвиговой деформации, осуществляемой на начальных стадиях фрикционного нагружения посредством дислокационного механизма (скольжением и двойникованием), активную роль играет и альтернативный способ деформации – ротационный (поворотный). Благодаря чему создаются условия формирования сильно развитой фрагментированной структуры трения с отчетливо выраженными большеугловыми границами – ультрадисперсного и даже более тонкого, нанокристаллического, масштаба, характеризующаяся повышенным сопротивлением износу.

Материалом исследования служили ленточные образцы мартенситной стали 70С2ХА. Часть ленточных образцов после закалки была подвергнута фрикционному деформированию (с обеих сторон) в режиме сухого трения путем механического воздействия твердосплавного индентора, имевшего рабочую головку полусферической формы радиусом 2,5 мм. Нагружение проводилось на установке для испытания на изнашивание при давлении 300 Н и скорости скольжения 0,22 м/с. Реверсивное перемещение индентора с последующим поперечным смещением позволяло обработать образец по всей поверхности и практически исключить его разогрев. Рентгенографический фазовый анализ был использован для определения периодов решетки мартенсита и содержания в нем углерода путем анализа тетрагонального дублета линий, полученных отражением от совокупности плоскостей $\{211, 121\}$ и $\{112\}$. Фазовый анализ выполнялся после обработок, включающих закалку на мартенсит, отпуск, а также фрикционное деформирование после закалки. Микротвердость ленточных образцов измерялась при нагрузке 50 г. Предел упругости ленты с допуском на остаточную деформацию, равную 0,03 %, определялся методом чистого изгиба.

Структура закаленной стали представляет собой характерный морфологический тип пакетного мартенсита, имеющего форму примерно одинаково ориентированных тонких пластин. Последующий отпуск приводит к получению структуры троостита отпуска – высокодисперсной феррито-карбидной смеси в сочетании с пересыщенным матричным α -твердым раствором. Однако микродифракционная картина фиксирует наличие рефлексов, которые следует интерпретировать как отражение от карбидной фазы. На рис. 1 представлена микроструктура закаленной и отпущенной стали, подвергнутой фрикционному деформированию.

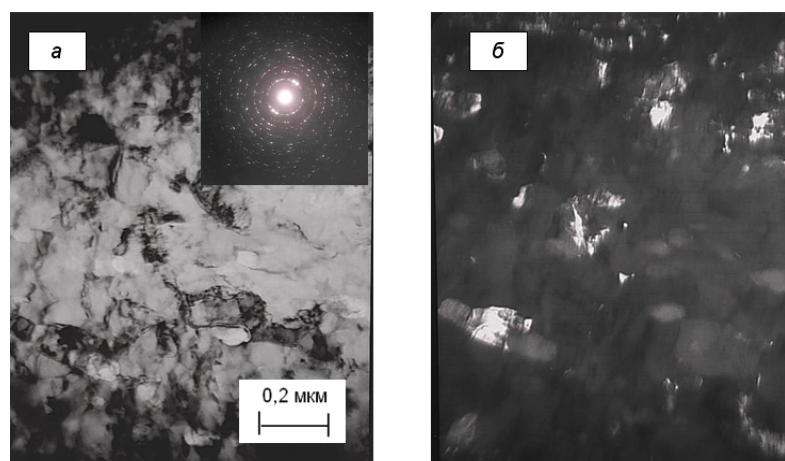


Рис. 1. Структура стали 70C2XA после закалки от 860 °С (масло), фрикционной обработки и отпуска 400 °С, 1 ч: *а* – светлопольное изображение; *б* – темнопольное изображение в рефлексе $(110)_\alpha$

В данном случае имеются явные отличия в тонкой структуре. Наряду с ярко выраженной дисперсностью фрагментов (размером до 50–100 нм), имеющих форму, близкую к равноосной, фиксируются многочисленные точечные рефлексы, расположенные на дебаевских кольцах. Темнопольное изображение (рис. 1, *б*) подтверждает наличие сильно фрагментированной матричной фазы.

В табл. 1 приведены результаты измерения периода решетки мартенсита после указанных обработок и оценка степени тетрагональности решетки мартенсита.

Таблица 1

Результаты определения периодов решетки мартенсита

| Обработка | a , нм | c , нм | c/a | Содержание углерода, % |
|--|----------|----------|-------|------------------------|
| Закалка 860 °С | 0,2858 | 0,2932 | 1,026 | 0,65 |
| Закалка 860 °С + отпуск 400 °С, 1 ч | 0,2866 | - | - | - |
| Закалка 860 °С + трение | 0,2868 | 0,2879 | 1,004 | 0,18 |
| Закалка 860 °С + трение + отпуск 400 °С, 1 ч | 0,2867 | - | - | - |

Полученный результат отражает очевидную тенденцию – фрикционное нагружение стимулирует деформационный распад тетрагонального мартенсита (динамическое деформационное старение). Предполагается, что в подобных условиях деформации углерод уходит из α -твердого раствора и осаждается на размноженных дислокациях, обеспечивая их эффективную блокировку.

В табл. 2 представлены данные, характеризующие прочностные свойства обработанных ленточных образцов. Поверхностное фрикционное деформирование приводит к очевидному повышению микротвердости H_{50} и условного предела упругости $\sigma_{0,03}$. При этом по сравнению со значениями предел упругости относительно больший эффект регистрируется для показателей микротвердости (прирост на 10 и 23 % соответственно).

Таблица 2

Результаты измерения микротвердости и предела упругости стали 70C2XA

| Вид обработки | H_{50} | $\sigma_{0,03}$, МПа |
|---|----------|-----------------------|
| Закалка 860 °С, масло | 505 | - |
| Закалка 860 °С, масло + отпуск 400 °С, 1 ч | 395 | 2550 |
| Закалка 860 °С, масло + трение | 580 | - |
| Закалка 860 °С, масло + трение + отпуск 400 °С, 1 ч | 485 | 2780 |

По результатам усталостных испытаний, получен вполне ожидаемый результат – дополнительная обработка трением существенно усиливает сопротивление циклическому нагружению. Если прочностные характеристики (H_{50} , $\sigma_{0,03}$) возрастают относительно умеренно (до 15 %), то усталостные свойства более чувствительно реагируют на фрикционную обработку: число циклов до разрушения увеличивается три раза.

Таким образом, положительный эффект наклепа сохраняется даже после проведения заключительного отпуска. В силу того, что лучший эффект упрочнения фиксируется при измерении микротвердости, то можно полагать, что больший вклад дает увеличение плотности дислокаций и фрагментация кристаллов мартенсита.

Поверхностная обработка закономерным образом отражается на сопротивлении усталостному разрушению. Такой способ деформирования как дополнительное упрочнение трением обеспечивает не только наклеп, но и создание благоприятной схемы напряженного состояния, где доминирующую роль играют сжимающие напряжения.