

И. А. ВАКУЛЕНКО (ДИИТ)

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛОСОВОЙ ДИСЛОКАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ ХОЛОДНОДЕФОРМИРОВАННОЙ СТАЛИ

Дослідження структури холоднокатаної на 20 % низьковуглецевої сталі свідчать, що існують значні об'єми фериту, які мають вигляд періодичних дислокаційних структур, подібних чарунковим. Після чотирьох циклів знакозмінного згину виявлені зміни розподілу дислокацій в чарунках та смуговій структурі.

Исследования структуры холоднокатаной на 20 % низкоуглеродистой стали показали существование значительных объемов феррита, имеющих вид периодических дислокационных структур, подобных ячеистым. После четырех циклов знакопеременного изгиба обнаружены изменения дислокационного распределения в ячейках и полосовой структуре.

Investigations of the structure of cold rolling 20% low carbon steel showed the existence of a considerable volume of ferrite that have periodic dislocation structures, similar to dislocation cells. After four alternating bending cycles, there have been noted changes in the dislocation distribution in cells and the strip structure.

По сравнению с однонаправленным деформированием, изменение знака нагружения сопровождается не только снижением сопротивления малым пластическим деформациям [1], но и напряжения течения [2]. При этом одновременно происходит уменьшение плотности дефектов кристаллического строения, введенных в металл при первоначальном нагружении и изменение их распределения [1; 2]. Можно полагать, что изучение процессов структурообразования при знакопеременном нагружении позволит объяснить разупрочнение углеродистой стали, например, после холодной пластической деформации.

Целью настоящего исследования явилось изучение закономерностей эволюции дислокационной структуры низкоуглеродистой холоднокатаной стали после знакопеременного изгиба.

Материалом для исследования служил холоднокатаный на 20 % листовой прокат толщиной 1 мм из стали, содержащей 0,12 % С; 0,50 % Мп; 0,31 % Si; 0,015 % Р; 0,030 % S. Знакопеременное деформирование изгибом осуществляли, совместно с предварительным натяжением полосы до уровня результирующих напряжений не выше 0,2 от предела текучести, на специально разработанной установке [3].

Электронно-микроскопические исследования на просвет проводили на электронном микроскопе УЭВМ-100К при ускоряющем напряжении до 100 кВ. Подготовка объекта для исследования осуществляли по методике [4].

Увеличение числа циклов, при изгибно-растяжном деформировании холоднокатаной низкоуглеродистой стали, сопровождается монотонным снижением пределов текучести и прочности до 20 % при одновременном повышении относительного удлинения в 1,5–2 раза [3]. Как показали электронно-микроскопические исследования, развитие процессов разупрочнения при изгибно-растяжном деформировании холоднокатаного металла, обладающего несовершенной дислокационной ячеистой структурой (рис. 1, а), обусловлено субструктурными изменениями – измельчением ячеек, ростом их равноосности, сдвигом субграниц [2].

Дополнительное изучение внутреннего строения холоднокатаной стали, помимо начальных этапов формирования ячеистой структуры (рис. 1), с размытыми субграницами, в которых довольно хорошо различаются отдельные дислокации, позволило обнаружить структурные образования (рис. 1, б, в), по внешним признакам существенно отличающиеся от субграниц ячеек и напоминающие полосовые структуры усталостного происхождения [4].

Анализ внутреннего строения отдельных полос (рис. 1, в) указывает на существование немонотонностей дислокационного распределения и возможное их ориентирование в направлении поперек полосы. Обнаруженные участки со структурой подобной полосовой даже в случае формирования несовершенной ячеистой субструктуры, в первую очередь обусловлены неравномерностью распределения дислокаций, особенно на ранних этапах пластического течения [1; 2].



a

б

в

Рис. 1. Дислокационная структура низкоуглеродистой стали после 20 % пластической деформации. Увеличение 13 000 x 1,1



a

б

в

Рис. 2. Дислокационная структура холоднокатаной на 20 % стали после 4-х циклов знакопеременного изгиба. Увеличение 13 000 x 1,1

Сравнительный анализ тонкокристаллического строения холоднокатаной стали (см. рис. 1), подвергнутой четырем циклам знакопеременного изгиба (см. рис. 2), обнаружил существенные различия. Прежде всего обращают на себя внимание изменения, произошедшие в полосовой структуре.

На основании этого, обнаруженное ранее в результате знакопеременного нагружения развитие аннигиляционных процессов [2], вместе со снижением полюсной плотности холоднокатаного состояния [3] получают дополнительное объяснение. Как следует из анализа внутреннего строения стали, в результате знакопеременного изгиба, ранее размытая с очень мало различающейся плотностью дислокаций (ρ) полосовая структура (см. рис. 1, *в*) претерпевает существенные изменения (см. рис. 2, *а*).

Наблюдаемые вытянутые отдельные петли или участки скопления петель, свидетельствуют о переходе дислокаций из областей с пониженной ρ в полосы с высокой плотностью дислокаций (см. рис. 2, *б*). При этом значительно

возрастает градиент ρ между областями (разная контрастность). Следовательно, в первом приближении, помимо изменений дислокационной ячеистой структуры, разупрочнение холоднокатаного металла после знакопеременного изгиба связано с формированием полосовой структуры с резко возрастающим градиентом дислокаций.

Кроме этого, формирование отдельных участков, соединяющих параллельно расположенные полосы с повышенной плотностью дислокаций (см. рис. 2, *б*, *в*), можно рассматривать как свидетельства развития скольжения по кристаллографическим системам, отличающимся от имеющих место при деформации прокаткой.

Приведенные данные находятся в достаточно хорошем согласии с ранее обнаруженными изменениями текстуры холоднокатаного металла [2; 3]: в результате знакопеременного изгиба появляются рефлексy полюсной плотности (212) не характерные для холоднокатаного металла. Они снижают уровень текстурных параметров углеродистой стали после прокатки.

На основании приведенных экспериментальных данных можно полагать, что наблюдаемые релаксационные явления при знакопеременном изгибе (уже после 2-х циклов [2; 3]) холоднокатаной стали в значительной степени обусловлены способностью дислокаций перемещаться на значительно большие расстояния внутри полос, чем в случае полиэдрической дислокационной ячеистой структуры. Оценивая величину пластической деформации (ε) по зависимости [1]

$$\varepsilon = \rho v \ell, \quad (1)$$

где v – вектор Бюргерса; ℓ – длина свободного пробега дислокаций.

Для случая полосовой структуры, которую можно представить как разновидность вытянутых дислокационных ячеек [4], ε должна быть выше, чем для равноосной субструктуры. Даже в случае одинаковой плотности дислокаций имеем

$$\ell_{\text{п}} > \ell_{\text{я}},$$

где $\ell_{\text{п}}$ и $\ell_{\text{я}}$ – длина свободного пробега дислокаций, соответственно для полосовой и равноосной ячеистой структур.

Таким образом, трансформацию дислокационной субструктуры при реверсивном изгибе холоднокатаной стали, происходящую по двум направлениям: совершенствование равноосных ячеек [2; 3] и видоизменения в полосовой

структуре, необходимо рассматривать как процесс возникновения областей, обладающих свойствами разупрочненного металла. Увеличение числа циклов (более 4-х) сопровождается прогрессирующим разупрочнением металла в целом, что связано с ростом объемной доли указанных областей с пониженным уровнем прочностных характеристик.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бабич В. К. Деформационное старение стали / В. К. Бабич, Ю. П. Гуль, И. Е. Долженков. – М.: Металлургия, 1972, – 320 с.
2. Вакуленко И. А. Структура и свойства углеродистой стали при знакопеременном деформировании. – Д.: Gaudeamus, 2003, – 94 с.
3. Вакуленко И. А. Деформирование по схеме изгиб-растяжение холоднокатаных низкоуглеродистых листовых сталей / И. А. Вакуленко, Ю. А. Богачев, В. А. Пирогов // Металлы, – 1991. – № 5, – С. 155–159.
4. Горицкий В. М. Дислокационная структура и особенности строения поверхности изломов образцов железа испытанных на усталость при 77 и 293°K / В. М. Горицкий, В. Ф. Терентьев, Л. Г. Орлов // В кн. Усталость и вязкость разрушения металлов. – М.: Наука, 1974. – С. 148–161.

Поступила в редколлегию 20.10.2005.