

О.Н.Перков, В.М.Кузьмичёв

О МЕХАНИЗМЕ ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРА ЗЕРНА ФЕРРИТА НА УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

Институт черной металлургии НАН Украины

Исследовано влияние размера зерна феррита на усталостную прочность низкоуглеродистой стали. Показано, что с ростом размера зерна феррита снижение уровня усталостной прочности обусловлено ускорением процессов локализации пластического течения. Одно из объяснений указанного явления - начало формирования периодических дислокационных структур подобных ячеистым.

Ключевые слова: низкоуглеродистая сталь, размер зерна феррита, усталостная прочность, дислокационные структуры

Для однофазных металлов и низкоуглеродистых сталей основным структурным показателем является размер зерна, который определяет уровень сопротивления металла распространяющемуся пластическому течению. На основании этого измельчение зёрненной ферритной структуры низкоуглеродистой стали как при однонаправленном нагружении, так и при знакопеременном циклическом деформировании сопровождается ростом прочностных свойств металла [1]. Более того, как свидетельствуют многочисленные исследования [1 - 3], характер зависимости указанных параметров от размера зерна во многом подобен и хорошо описывается соотношением Холла-Петча:

$$\sigma_{-1} (\sigma_T) = \sigma_0 + k_y \cdot d^{-1/2}, \quad (1)$$

где σ_{-1} - усталостная прочность; σ_0 и k_y - постоянные, которые подобны σ_T и k_y , определяемым из анализа зависимости предела текучести σ_T при статическом нагружении.

Для начального этапа пластического течения низкоуглеродистых сталей характерны два типа текучести. Одному из них соответствует высокая неоднородность распределения деформации, которая обусловлена процессами зарождения и распространения полос Людерса-Чернова [4]. Другой тип определяется плавным переходом на кривой деформации от упругого участка в область однородного деформационного упрочнения (ОДУ). В значительном числе случаев поведение металла при нагружении можно в равной степени отнести к любому из указанных типов текучести (площадки текучести с тангенсом угла наклона, приближающимся по абсолютным значениям к области ОДУ), поэтому следует ожидать влияния характера начальной текучести на уровень свойств при циклическом деформировании.

В связи с этим несомненный интерес представляет объяснение причин влияния размера зерна феррита на усталостную прочность низкоуглеродистой стали.

Цель работы - на основе анализа условий зарождения и распространения пластического течения объяснить характер поведения низкоуглеродистой стали при циклическом нагружении.

Материал и методика исследований. Материалом для исследования служил листовая прокат толщиной 1,5 мм из низкоуглеродистой стали с содержанием углерода 0,07%. Разный размер зерна феррита получали в результате комбинирования горячей прокатки, холодной деформации и окончательного отжига. Из анализа кривых деформации определяли параметры, которые позволяют оценить процессы зарождения и распространения пластического течения. Усталостные испытания проводили при нагружении чистым изгибом на машине типа «Сатурн-12». Размер зерна феррита определяли под световым микроскопом с использованием методик количественной металлографии [5].

Результаты и их обсуждение. Несмотря на то, что при однонаправленном статическом нагружении изменения предела текучести (σ_T) и напряжения течения в области микротекучести (σ_0) в зависимости от размера зерна феррита описываются одним и тем же уравнением (1), металл по достижении указанных напряжений обладает разной дислокационной структурой [6]. Действительно, как следует из эксперимента, рост напряжения от σ_0 до σ_T сопровождается монотонным увеличением σ_i и k_y (от 50 до 65 Н/мм² и от 13 до 27,5 Н/мм^{3/2} соответственно). Приведенный характер изменения указанных параметров обусловлен влиянием прироста плотности дислокаций в процессе течения металла на рост сопротивления источникам дислокаций. Одновременно с увеличением требуемого уровня напряжения для генерирования дислокаций повышается величина k_y , которая характеризует меру трудности преодоления дислокациями ферритных границ [4, 6]. Обусловлено приведенное изменение k_y в области микротекучести блокирующей способностью границ зерен из-за скопления дислокаций вблизи них [7]. Таким образом, при нагружении металла от σ_0 до σ_T непрерывный рост k_y , указывающий на увеличение плотности дислокаций, является необходимым условием формирования зародыша полосы деформации. Другим не менее важным условием, необходимым для формирования полос деформации, как показано в работе [8], является определенное соотношение между напряжением трения кристаллической решетки σ_i и величиной разблокирования дислокаций σ_d находящихся в металле. Для случая возникновения полос Людерса-Чернова должно выполняться неравенство

$$\sigma_d > \sigma_i \quad (2)$$

где $\sigma_d = k_y / d^{1/2}$.

Из неравенства (2) следует, что по достижении результирующим напряжением уровня значений σ_d начинается резкий прирост плотности подвижных дислокаций (ρ_m), которые за счет низких величин сопротивления движению лавинообразно перемещаются и формируют зародыши полос деформации [4, 8]. При этом выполняется соотношение между локальной скоростью деформации ε_p и скоростью движения дислокации v [9]:

$$\varepsilon_p = kb \rho_m v, \quad (3)$$

где k — геометрический фактор; b - вектор Бюргера.

В случае нарушения условия (2), т.е. когда $\sigma_d < \sigma_i$, разблокирование дислокаций происходит при уровнях напряжений ниже напряжения сопротивления движению дислокаций.

В итоге неодновременность движения отдельных дислокаций в разных объемах зерен феррита приводит к нарушению условия (3) и, как следствие, к исчезновению деформации Людерса (ε_L).

Для проверки данного объяснения воспользуемся зависимостью, основанной на соотношении $\sigma_d = k_y / d^{1/2}$ при $\sigma_d = \sigma_i$, которая позволит оценить критический размер зерна феррита d_k , больше которого деформация ε_L в стали должна отсутствовать:

$$D_k = (k_y / \sigma_i)^2 \quad (4)$$

После подстановки в уравнение (4) экспериментальных значений $\sigma_i = 65 \text{ Н/мм}^2$ и $k_y = 27,5 \text{ Н/мм}^{3/2}$ получили $d_k = 180\text{-}200 \text{ мкм}$. Как показано в работах [6, 7], чем более грубозернистая структура феррита, тем меньше ε_L и тем при более низкой плотности накопленных дислокаций и высоких значениях параметров деформационного упрочнения начинается область ОДУ. Учитывая, что скорость деформационного упрочнения ($d\sigma/d\varepsilon$) пропорциональна приросту плотности дислокаций ($\Delta\rho$) [7], получаем, что в случае огрубления ферритной структуры увеличение $d\sigma/d\varepsilon$ свидетельствует о приросте $\Delta\rho$. Однако, высоким скоростям прироста дислокаций соответствует повышенная неоднородность их распределения. Так, построение зависимости ε_L и деформации формирования дислокационной ячеистой структуры (распад равномерного распределения дислокаций на периодическую структуру) от размера зерна феррита d показывает, что исчезновение площадки текучести должно наблюдаться при $d \approx 300 \text{ мкм}$ [6]. Подтверждают приведенное положение внешний вид диаграмм растяжения (на которых ε_L отсутствует).

Действительно, как следует из анализа внутреннего строения образцов исследуемой стали, прирост размера зерна феррита сопровождается увеличением ширины формирующихся полос деформации. Можно полагать, что с увеличением d имеет место переход от равномерного распределения дислокаций либо определенного их градиента во фронте зародыша полосы деформации [9] к периодическим структурам, подобным ячеистым. В то же время формирование фронта полосы Людерса-Чернова можно рассматривать как своеобразный локализатор пластического

течения [10], наличие которого неизбежно должно оказывать влияние на поведение металла при знакопеременном циклическом нагружении.

На рисунке приведена зависимость предела текучести и усталостной прочности от размера зерна феррита, которая достаточно хорошо описывается уравнением (1). Расположение кривой σ_{-1} под кривой σ_T для однонаправленного статического растяжения указывает, что только для σ_i и σ_{-1} наблюдаются близкие значения, в то время как k_y примерно в 2 раза больше. На основании этого можно полагать, что роль k_y как характеристики, оценивающей проницаемость границ зерен феррита распространяющемуся течению при знакопеременном нагружении, не ниже k_y при статическом деформировании. Рост степени пластической деформации сопровождается снижением k_y . Аналогичное влияние оказывает величина предварительной деформации при реверсивном нагружении и на σ_{-1} . В то же время σ_i и σ_{-1} меняются по-разному: если растет σ_i и может превышать значения для недеформированного состояния в несколько раз, то σ_{-1} остается практически неизменной величиной [11].

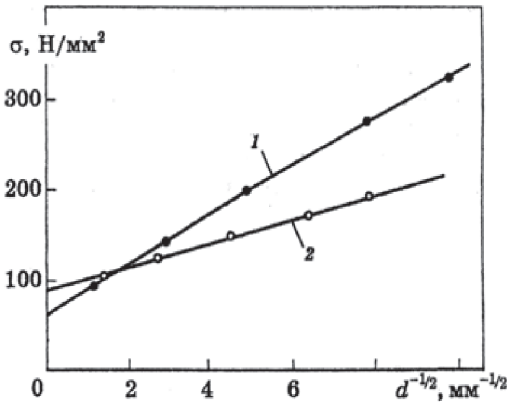


Рисунок. Зависимости предела текучести σ_T при статическом растяжении (1) и усталостной прочности σ_{-1} (2) исследуемой стали от размера зерна феррита d

Учитывая, что в зависимости от схемы нагружения (однонаправленная или реверсивная) формируемая на начальных стадиях дислокационная субструктура будет в значительной мере определять поведение металла при нагружении, определим граничные условия, подобно тому как это было выполнено для однонаправленного деформирования. Для оценки критического размера зерна феррита при знакопеременном циклическом нагружении, при котором на ранних стадиях деформирования начинается формирование периодических дислокационных структур, воспользуемся соотношением (4).

После подстановки экспериментальных величин $\approx 90 \text{ Н/мм}^2$ и $k'_y = 14 \text{ Н/мм}^{3/2}$ получили $\approx 24\text{-}25 \text{ мкм}$, что примерно в 7-8 раз меньше аналогичной характеристики для однонаправленного нагружения. Из того следует, что, если при статическом растяжении исследуемая сталь с размером зерна $d = 25 \text{ мкм}$ обладает деформацией Людерса 3,2%, то при циклическом нагружении последовательно сменяемые этапы упрочнения и разупрочнения за счет аннигиляции дислокаций в разных объемах ферритных зерен (вблизи границ и внутри зерен) приводят к более быстрому переходу от равномерного распределения дислокаций к периодическому строению.

Таким образом, возникновение неоднородностей в распределении дефектов кристаллического строения можно рассматривать как процесс, способствующий ускорению зарождения и роста трещин и, как следствие этого, более быстрому наступлению разрушения металла.

На основании приведенных результатов можно полагать, что одним из объяснений сложного механизма влияния размера зерна феррита низкоуглеродистой стали на ее усталостную прочность является локализация пластического течения, имеющая место от момента формирования периодических дислокационных структур подобным ячеистым.

Выводы. 1. Ускорение процессов локализации пластического течения с увеличением размера зерна феррита является причиной снижения уровня значений усталостной прочности низкоуглеродистой стали.

2. Формирование неоднородностей в равномерном распределении дефектов кристаллического строения облегчает развитие процессов разрушения при циклическом нагружении стали.

1. *Иванова В.С.* Усталостное разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1963. – 203 с.
2. *Усталость и хрупкость металлических материалов.* / В.С.Иванова, С.Л.Гуревич, И.М.Копьев и др. – М.: Наука, 1968. – 216 с.
3. *Троценко В.Т.* Усталость и неупругость металлов. – Киев: Наук, думка, 1971. – 267 с.
4. *Коттрелл А.Х.* Дислокации и пластическое течение в кристаллах. – М.: Металлургиздат, 1958. – 267 с.
5. *Салтыков С.Л.* Стереометрическая металлография. М.: Металлургиздат, 1958. – 446 с.
6. *Вакуленко И.А., Раздобрев В.Г., Перков О.Н.* Влияние структурных параметров углеродистой стали на процессы формирования полосы Людерса-Чернова // *Металлы.* – 2004. – №4. – С.108-112.
7. *Бабич В.К., Гуль Ю.П., Долженков И.Е.* Деформационное старение стали. – М.: Металлургия, 1972. – 320 с.

8. *Cottrell A.H.* Theory of brittle fracture in steel and similar metals. // Trans. Met. Soc. – AIME. – 1958. – V.212. – P.192-209.
9. *Garofalo F.* Factors affecting the propagation of a Lüders band and lower yield stress in iron. // Met. Trans. – 1971. – V.2. – №8. – P.2315-2317.
10. *Вакулєнко И.А., Пирогов В.Л., Бабич В.К.* Пластическое течение стали со сверхмелким зерном феррита. // Изв. АН СССР. Металлы. – 1989. – №4. – С.145-147.
11. *Вакулєнко И.А.* Структура и свойства углеродистой стали при знакопеременном деформировании. – Днепропетровск: Сайеатив, 2008. – 94 с.

*Статья рекомендована к печати
канд.техн.наук А.И.Бабаченко*

О.М.Перков, В.М.Кузьмічєв

Про механізми впливу розміру зерна фериту на втомну міцність низьковуглецевої сталі

Досліджено вплив розміру зерна фериту на втомну міцність низьковуглецевої сталі. Показано, що з ростом розміру зерна фериту зниження рівня втомної міцності обумовлено прискоренням процесів локалізації пластичної течії. Одне з пояснень зазначеного явища – початок формування періодичних дислокаційних структур подібних нїздруватим.

Ключові слова: низьковуглецева сталь, розмір зерна фериту, втомна міцність, дислокаційні структури.

O.N.Perkov, V.M.Kuzmichєv

On the mechanism of influence of the grain size of ferrite on the fatigue strength low carbon steel

The effect of the ferrite grain size on fatigue strength of mild steel. It is shown that with increasing size of the ferrite grains decrease in fatigue strength due to the acceleration of the process of plastic flow localization. One explanation for this phenomenon - the beginning of the formation of periodic dislocation structures such honeycomb.

Keywords: low carbon steel, ferrite grain size, fatigue strength, dislocation structures